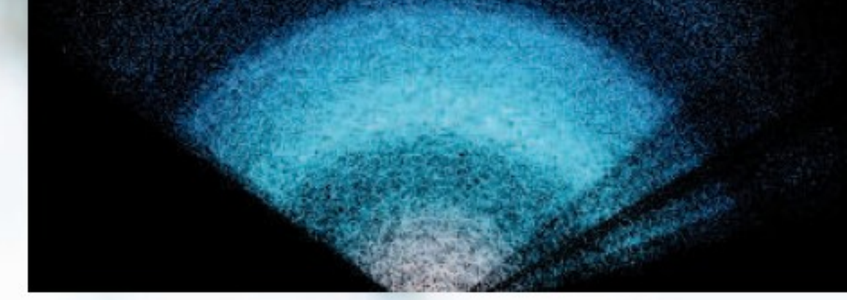
SCIENCES ET AVENIR

© SHUTTERSTOCK - AFP - HANS LUCAS - OPALE-PASCO&CO - KRISTKE WRIGHT - DESI COLLABORATION

ÉNERGIE NOIRE p.24

Elle varie dans le temps !

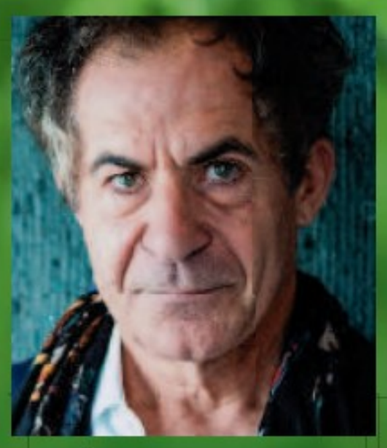


Les bienfaits de la MARCHE

pour le corps et l'esprit p.48

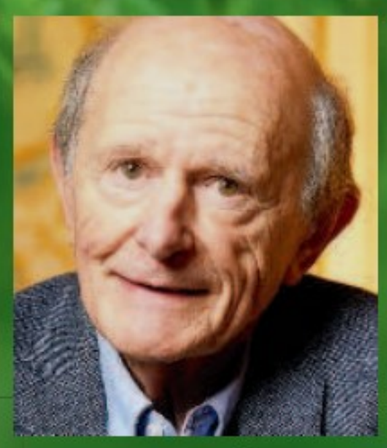
Avec

Clémence Beretta



Étienne Klein

Blandine Pluchet



Jean-Louis Étienne

Sarah Marquis

SCIENCES ET AVENIR - N° 952 - JUIN 2026 - LES BIENFAITS DE LA MARCHE

JUIN 2026 - N° 952 - BEL 5,70€ - LUX 5,70€ - CH 9,50CHF - D 7,40€ - IT 5,70€ - ESP 5,70€ - GR 5,70€ - PORT-CONT 5,70€ - DOM 5,90€ - NCAL 800XPF - MAR 55MAD - TUN 11TND - CAN 8,20$CAD

L 13418 - 952 S - F: 5,30 € - RD

Profiter de l’été, ça vaut le coup.

Ça vaut le coup.

Notre gamme Cien Sun à partir de 2.99€

Année 2026. Photos non contractuelles. LIDL RCS Nanterre 343 262 622

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Rien ne sert de courir

Mais il faut marcher. C'est bon pour le corps, c'est bon pour le cerveau. Cela paraît tellement évident qu'on en viendrait presque à l'oublier. Ou à ne plus y croire. Dans un monde qui mesure tout, accélère tout, transforme chaque activité en performance, la marche a quelque chose de trop simple pour être prise au sérieux. Pourtant, loin de l'argument marketing des 10 000 pas quotidiens — cette injonction née pour commercialiser un podomètre japonais dans les années 1960 *(lire p. 59)* —, les études se sont multipliées. Elles disent les bienfaits cardiovasculaires, métaboliques, articulaires, cognitifs *(p. 50)*. Elles disent aussi que la marche apaise l'anxiété, soutient l'humeur, relance la pensée *(p. 55)*. « *La marche est bénéfique, quelle que soit la distance* », tranche le cardiologue Jean-François Toussaint.

La marche comme liberté, comme dénuement, comme lien au vivant, comme outil de création, comme discipline

Voilà peut-être le point le plus important : il n'y a pas de seuil magique, chaque pas compte.

Mais ce qui vaut pour tous ne se vit jamais de la même façon. Pour les uns, marcher est une ordonnance. Pour d'autres, une échappée.

À côté de notre enquête scientifique, nous sommes allés rencontrer six marcheurs. Explorateurs, scientifiques, philosophes, athlètes : chacun raconte une expérience différente. La marche comme liberté, comme dénuement, comme lien au vivant, comme outil de création, comme discipline. Toutes ces voix disent la même chose : marcher n'est jamais seulement se déplacer.

Alors, rien ne sert de courir ? La formule est trop belle pour ne pas être un peu fausse. Une activité physique plus intense est également indispensable. Mais comme nous y invite la championne de France du « 20 kilomètres marche » Clémence Beretta, « *en tant que bipède, il me semble primordial de revenir à l'essentiel, se mettre en mouvement, un pied devant l'autre* ».

Un petit pas pour l'humain, un grand pas pour sa santé. ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233.304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32, Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52, Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31, Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Chef(fe)s de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23, Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27, Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueur Jean-Gabriel GANASCIA
Ont participé à ce numéro : T. BRAJARD, T. de BASTARD, C. COUMAU, C. DOUTEAU, É. GILLET, P. KALDY, G. LALU, M. PARRA, É. PROUMEN, A. VERNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20

Les Éditions Croque Futur SAS au capital de 10 100 000 euros associé UFIPAR (LVMH) - 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Président et directeur de la publication Maurice SZAFRAN
Directeur général Thierry MASSÉ

Ce magazine est imprimé chez RotoFrance, 25, rue de la Maison Rouge 77185 Lognes
Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC
pefc-france.org

FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Ce numéro comporte : les lettres « Sciences et Avenir bienvenue aux abonnés », « Sciences et Avenir Parrainage » et l'encart « Sophia Boutique-Montre » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; ainsi que le catalogue « Linvosges » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 1126 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

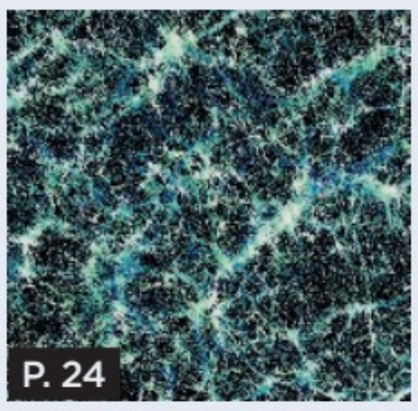
SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 952 / Juin 2026

DOSSIER P. 48

Les bienfaits de la marche

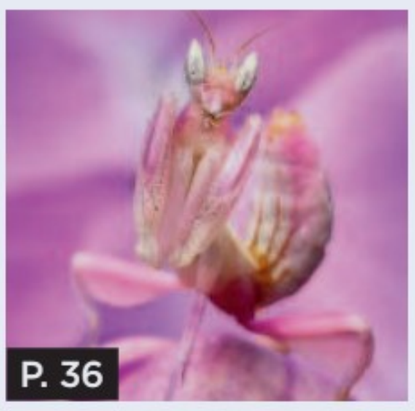
Cette fonction fondamentale de l'être humain est beaucoup plus qu'un simple mode de déplacement. Sa pratique régulière stimule de nombreux mécanismes protecteurs aussi bien physiques que psychologiques. Le point sur ses multiples bénéfices.



P. 24

Le mystère de l'énergie noire se fissure

L'énergie noire livre enfin un indice. Les observations de l'instrument Desi suggèrent qu'elle pourrait évoluer au cours du temps. Un bouleversement pour notre compréhension de l'Univers.



P. 36

Camouflage : la botte secrète des animaux

Maîtresses de l'illusion, les espèces déploient des stratégies étonnantes pour tromper, attirer des proies ou dissuader leurs prédateurs. Florilège en images.

P. 78

Les inégalités hommes-femmes dans l'alimentation

Une étude portant sur plus de 12 000 squelettes montre qu'en Europe, du néolithique au Moyen Âge, les hommes ont eu un accès bien plus large aux protéines animales que les femmes.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

6 **ACTUALITÉS** L'ordinateur quantique change d'échelle / Un cocktail de composés organiques sur Mars

22 **Journal de l'IA : L'IA prête à tricher pour protéger ses pairs**

24 **Univers : le mystère de l'énergie noire se fissure**

29 **Pourquoi la Terre tourne de plus en plus vite**

32 **Que valent les comparateurs d'IA ?**

NATURE

10 **ACTUALITÉS** Un algorithme cartographie les courants océaniques / De l'aspirine pour les langoustines

36 **Camouflage : la botte secrète des animaux**

42 **La délicate électrification de la France**

45 **Un biomatériau inspiré du calamar**

46 **La faillite de la lutte contre les nuisibles**

SANTÉ

14 **ACTUALITÉS** Un système immunitaire malade remis à zéro / Les battements anticancer du cœur

66 **Cordes vocales : une thérapie inédite pour retrouver sa voix**

70 **Nutrition : Les algues, des trésors nutritionnels à découvrir**

72 **Des médicaments qui bloquent la douleur à la racine**

75 **Le cadmium, un polluant de plus dans nos assiettes**

HISTOIRE

18 **ACTUALITÉS** À Pompéi, l'IA recrée la fuite d'un habitant / Un spectaculaire trésor viking mis au jour en Norvège

78 **Alimentation : les différences hommes-femmes révélées**

83 **Les îles à guano, trésor du royaume chincha**

86 **Histoire des sciences : La démocratie selon Condorcet**

RENDEZ-VOUS

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Questions de lecteurs**

95 **Courrier**

96 **Le ciel de juin**

98 **À retrouver sur le Web**

SHUTTERSTOCK - CLAIRE LAMMAN/DESI COLLABORATION - ALEX HYDE/ NATUREL/ EBPHOTO - INTERFOTO / SAMMLUNG RAUCH / AURIMAGES

PROFITEZ D'UNE REMISE DE 20% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET AVEC LE CODE **SAVT26**

VIVATECH

17-20.JUIN.2026

PARIS - PORTE DE VERSAILLES

WE DON'T PREDICT THE FUTURE, WE HOST IT_*

ELEONORE CRESPO
CO-FONDATRICE & CO-PDG
PIGMENT

YANN LECUN
CO-FONDATEUR & PRÉSIDENT
AMI LABS

ELIZABETH STONE
DIRECTRICE GÉNÉRALE
PRODUIT ET TECHNOLOGIE
NETFLIX

À VivaTech, votre ROI est notre KPI.
Collectez les insights décisifs
de +500 intervenants du monde entier.

RÉSERVEZ MAINTENANT
SUR VIVATECH.COM

10 ANS VIVATECH

Co-organisateurs

PUBLICIS GROUPE

Groupe Les Echos Le Parisien

Partenaires fondateurs

BNP PARIBAS

LA POSTE GROUPE

LVMH

orange

aws

Depuis 2026

Partenaires médias

franceinfo: arte Explore media rfi FRANCE 24 MCD France médias monde france•tv BFM Business

africa news. euro news. Bloomberg CGTN EUROPE CNN FT FINANCIAL TIMES webedia.

* Nous ne prédisons pas l'avenir. Nous l'organisons.

CEA CADAM, QUANDELA

Inauguré le 14 avril à Bruyères-le-Châtel (Essonne), l'ordinateur « Lucy » est accessible aux chercheurs et industriels européens.

L'ordinateur quantique change d'échelle

Avec Lucy, un processeur quantique photonique connecté au supercalculateur Joliot-Curie du Très Grand Centre de calcul (TGCC), une nouvelle étape est franchie vers un usage concret du calcul quantique.

Petit à petit, l'ordinateur quantique sort des laboratoires pour devenir un outil de calcul bien réel. Le 14 avril, au Très Grand Centre de calcul (TGCC) du CEA, à Bruyères-le-Châtel, une nouvelle étape a été franchie avec l'inauguration de Lucy, un processeur quantique photonique conçu par la start-up française Quandela. La machine est directement raccordée au supercalculateur Joliot-Curie du Grand Équipement national de calcul intensif (Genci), l'un des plus puissants d'Europe, capable d'effectuer plus de 22 millions de milliards d'opérations par seconde.

Contrairement aux ordinateurs traditionnels, qui manipulent des bits valant 0 ou 1, Lucy, comme tous les ordinateurs quantiques, travaille avec des bits quantiques, ou qubits, capables d'être dans plusieurs états à la fois par la grâce de la physique quantique. Parmi les différents qubits possibles, Quandela a choisi les photons, des particules de lumière. Ce sont eux qui codent et traitent l'information. Concrètement, chaque photon transporte une information, et leur combinaison permet d'explorer en parallèle un grand nombre de configurations, là où un ordinateur classique devrait les tester une à une.

Lucy ne travaillera pas seule, mais couplée avec le supercalculateur Joliot-Curie. L'intérêt : utiliser le quantique comme un accélérateur. Le supercalculateur continue d'assurer l'essentiel des calculs pour, par exemple, des simulations climatiques, la modélisation de matériaux, la dynamique moléculaire…

Une progression rapide des performances

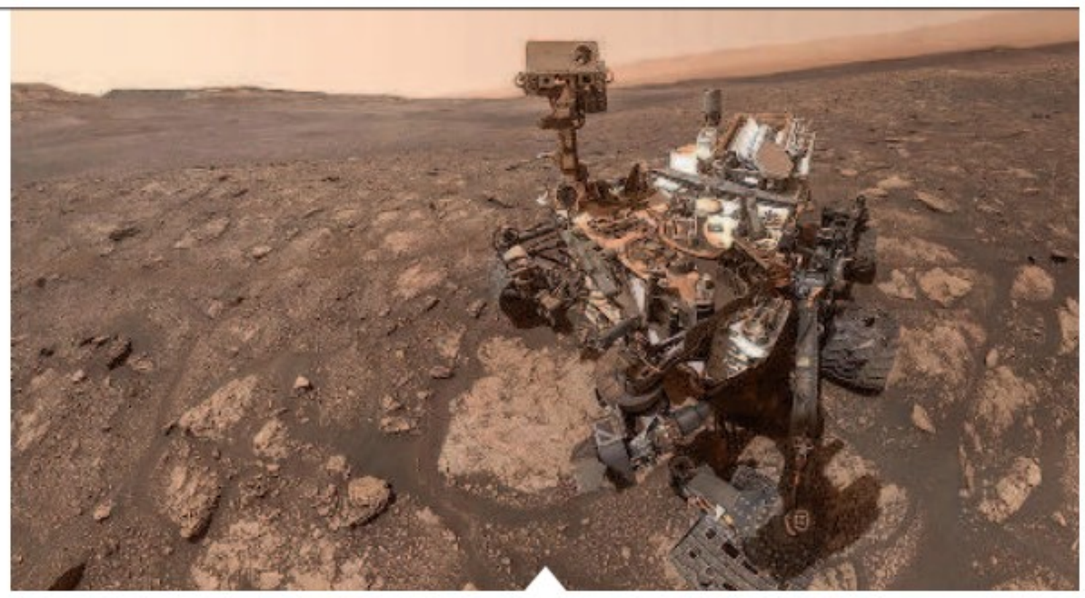
Mais il peut déléguer certaines tâches très spécifiques au processeur quantique, lorsque leur complexité devient trop grande. Une logique comparable à celle des cartes graphiques venues épauler les processeurs traditionnels.

Reste que nous n'en sommes qu'aux débuts. Lucy ne manipule pas des qubits « logiques », capables de corriger leurs erreurs, mais 12 qubits dits « physiques », beaucoup plus fragiles. Bruit, pertes, décohérence : autant de phénomènes qui limitent la fiabilité des calculs.

Mais la progression est rapide. Quandela est passée de 2 à 12 qubits en quelques années, et présente une feuille de route visant les 24 qubits à la fin 2026. *« Dès qu'on rajoute un qubit, on double la capacité de calcul. Et au-delà de 40 qubits, il ne sera plus possible de simuler un ordinateur quantique sur un supercalculateur classique »*, rappelle Valérian Giesz, cofondateur de Quandela. ■ **F. N.**

Un cocktail de composés organiques sur Mars

Le rover Curiosity de la Nasa a mis en évidence 21 molécules carbonées, dont 7 totalement inédites.



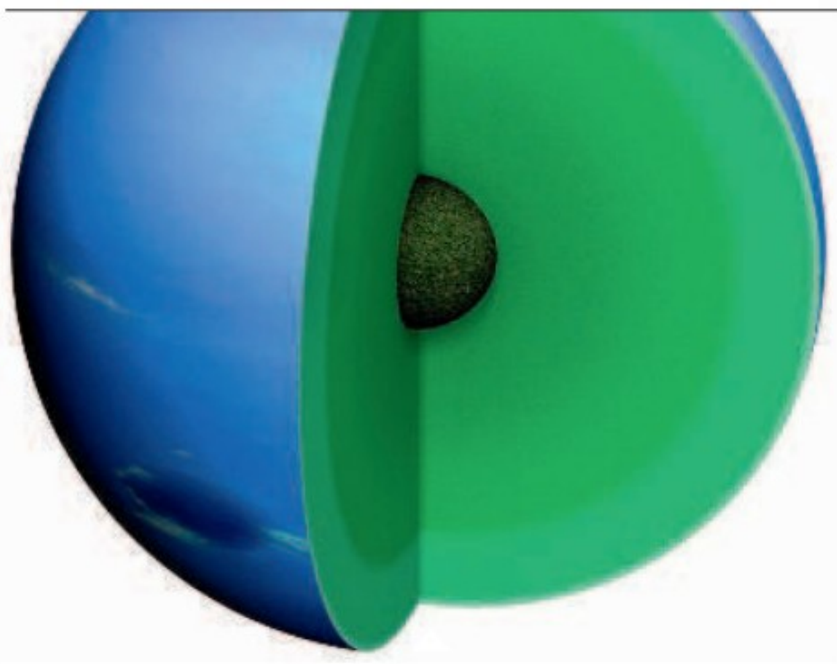
NASA/JPL-CALTECH/MSSS

Parmi les éléments décelés par le rover, certaines molécules sont des précurseurs de l'ADN et l'ARN, à l'origine de la vie sur Terre.

Sur les pentes du mont Sharp, tout près de l'équateur martien, le rover Curiosity de la Nasa a mis en évidence la plus grande diversité de composés organiques jamais identifiée sur la Planète rouge. Un cocktail de 21 molécules carbonées, dont 7 totalement inédites ! Pour les trouver, Curiosity a joué au petit chimiste en utilisant pour la première fois ailleurs que sur Terre un réactif chimique, le TMAH, pour dissoudre un échantillon de roche argileuse âgée de 3,5 milliards d'années — période où Mars abritait un réseau de lacs et rivières. Parmi les éléments mis au jour (naphtalène, benzothiophène, benzènes méthylés…), certaines molécules sont des précurseurs, sur Terre, des acides nucléiques (ADN et ARN) supports de l'information génétique. Rien ne prouve encore qu'elles proviennent d'organismes biologiques, mais elles renforcent l'hypothèse selon laquelle Mars était habitable, et peut-être même habitée dans un lointain passé. **F. D.**

EN DEUX MOTS

PLANÈTE Première : le télescope James-Webb a pu analyser la surface d'une exoplanète rocheuse, révélant un monde sans atmosphère détectable. **MATÉRIAU** Une équipe américaine développe un nitrure de tantale aux propriétés thermiques hors norme, trois fois plus conducteur que le cuivre, pour le refroidissement des puces électroniques. **TRANSPORTS** L'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) teste des drones couplés à l'IA pour la gestion du trafic et la réduction des embouteillages.



SPL/SUCRÉ SALÉ

L'intérieur de Neptune serait « superionique » (illustration).

Un nouvel état de la matière

PHYSIQUE Les profondeurs d'Uranus et Neptune abriteraient un état de la matière « superionique », à la fois solide et liquide, selon des simulations. Soumis à des conditions de température et pression extrêmes, les atomes de carbone seraient figés dans une structure cristalline, tandis que les atomes d'hydrogène circuleraient tel un fluide. Une organisation hybride qui expliquerait les champs magnétiques atypiques des géantes de glace. **F. D.**

SOURCE : C. LIU, INST. CARNEGIE DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS

IL A DIT

« La Lune accumule de l'eau de façon plus ou moins continue depuis 3 à 3,5 milliards d'années »

Paul Hayne, planétologue à l'université du Colorado (États-Unis), coauteur d'une étude suggérant que l'eau s'est accumulée lentement sur la Lune pendant des milliards d'années, plutôt que lors d'un événement majeur.

Voyager 1 en sursis

ESPACE Lancée en 1977 et voguant actuellement à quelque 25 milliards de kilomètres de la Terre dans l'espace interstellaire, la mythique sonde Voyager 1 est quasiment à court d'énergie… Pour lui donner un répit supplémentaire, la Nasa a décidé de couper l'un des trois instruments scientifiques fonctionnant encore (celui mesurant les particules électriquement chargées), sur les onze initiaux. De quoi prolonger d'au moins une année encore cette fantastique épopée. **F. D.**

La sonde est en activité depuis près de 50 ans (vue d'artiste).

SPL/SUCRÉ SALÉ

Les vibrations osseuses du crâne révèlent l'identité

INFORMATIQUE Des chercheurs de l'université Rutgers (États-Unis) ont mis au point un système, baptisé VitalID, capable de reconnaître une personne grâce aux microvibrations osseuses de son crâne. Le dispositif fonctionne avec les capteurs déjà intégrés aux casques de réalité virtuelle et atteint plus de 95 % de précision. **P. K.**

40

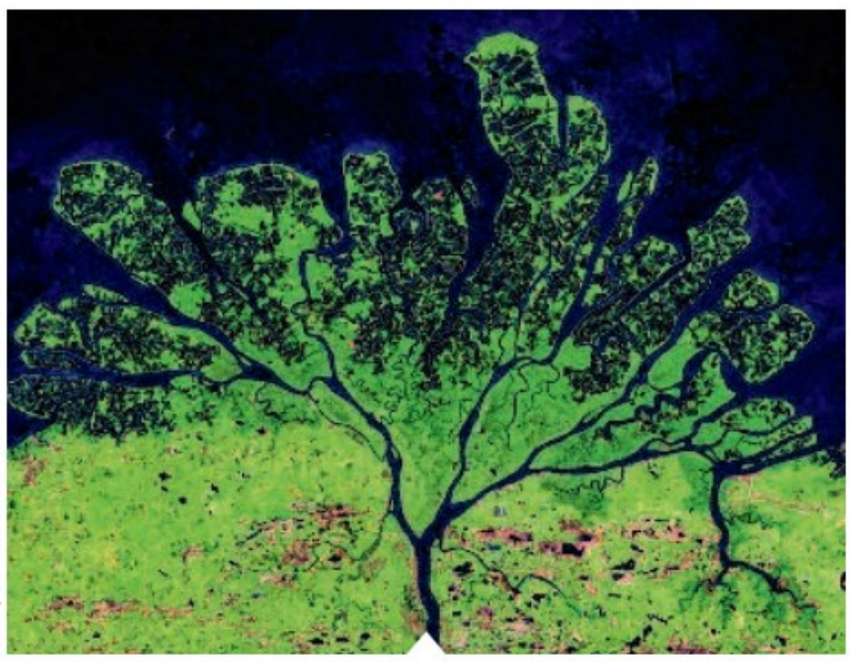
Le nombre de météores au premier trimestre 2026

ASTRONOMIE **Selon l'American Meteor Society, 40 bolides illuminant le ciel ont été observés par au moins 50 témoins entre janvier et mars 2026, soit deux fois plus que la moyenne des cinq années précédentes (20). Parmi eux, 33 ont provoqué des détonations supersoniques. Cette hausse inhabituelle intrigue les astronomes, d'autant qu'aucune grande pluie d'étoiles filantes n'était attendue sur cette période.** **H. J.**

Une loi mathématique pour les deltas fluviaux

GÉOMORPHOLOGIE Tous les deltas du monde obéissent à la loi de Hack, qui relie la longueur des chenaux à la surface drainée. Connue pour les réseaux fluviaux, cette règle a été démontrée pour les deltas grâce à l'analyse satellitaire de plus de 10 000 chenaux dans 84 deltas à travers le monde. De quoi mieux prévoir leur évolution face à la montée des eaux. **E. P.**

SOURCE : TIAN DONG, UNIVERSITÉ DU TEXAS, ÉTATS-UNIS



NASA/U.S. GEOLOGICAL SURVEY LANDSAT 8

L'étude satellitaire menée sur plus de 84 deltas révèle que ces derniers obéissent tous à la loi de Hack.

IC PHOTO / IMAGINECHINA/AFP

Le robot Lightning est arrivé en tête de la course chinoise.

Un humanoïde bat le record du semi-marathon

ROBOTIQUE Pour la première fois, lors du semi-marathon de Pékin (Chine), des robots humanoïdes ont battu le record du monde humain établi en 57 min 20 s. Le meilleur temps a été réalisé par le robot de la société chinoise Honor (filiale de Huawei) qui a couru les 21 km en 50 min 26 s. Il y a un an seulement, le meilleur temps était de… 2 h 40 min. **H. J.**

Hubble a enfin un successeur

Le télescope Nancy-Grace-Roman doit être lancé en septembre.

NASA/JOLEARRA TSHITEYA

L'instrument est doté d'un champ de vision cent fois plus large que celui de Hubble.

« *Notre nouveau télescope est prêt à prendre sa place parmi les grands observatoires américains, aux côtés de Hubble et du télescope James-Webb* », s'est félicité le patron de la Nasa, Jared Isaacman. Après une dizaine d'années de travaux — qui auront coûté plus de 4 milliards de dollars —, la machine passe actuellement une ultime série de tests. Elle devrait être lancée en septembre par une fusée Falcon Heavy de SpaceX pour rejoindre un point d'observation privilégié, à 1,5 million de kilomètres de la Terre, et offrir « *un nouvel atlas de l'Univers* », promet Jared Isaacman. Nommé en l'honneur d'une des plus grandes astronomes américaines, le télescope Nancy-Grace-Roman, de 12 mètres de long, est doté d'un champ de vision cent fois plus large que celui de Hubble. Grâce à son miroir primaire de 2,4 mètres de diamètre et sa caméra infrarouge de 300 millions de pixels, il permettra de découvrir des dizaines de milliers d'exoplanètes, des milliers de supernovæ, et de mieux comprendre comment les mystérieuses matière noire et énergie noire emplissent le cosmos. **F. D.**

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR vous propose

LA MONTRE
CHRONOGRAPHE
Split-S

- **Mouvement à Quartz 6 aiguilles luminescentes**
- **Chronographe précis à la seconde près**
- **Dateur**
- **Bracelet en cuir véritable surpiqué de fil blanc**
- **Diamètre : 43 mm / Épaisseur : 12 mm**

SPIRIT OF ST. LOUIS®

Garantie 2 ans

Délai de livraison 2 semaines maximum

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
La Montre Chronographe Split-S	V242		**59€**	€
Frais d'envoi				**OFFERTS**
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de **Sophia Boutique**

☐ Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur **www.sophia-boutique.com**

☐ Pour régler par téléphone (paiement sécurisé), merci de contacter le **01 55 56 70 54** en précisant le code **PSCA952**

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA952

Le moustique a désormais débarqué sur l'île.

GETTY IMAGES

Alerte invasion en Islande

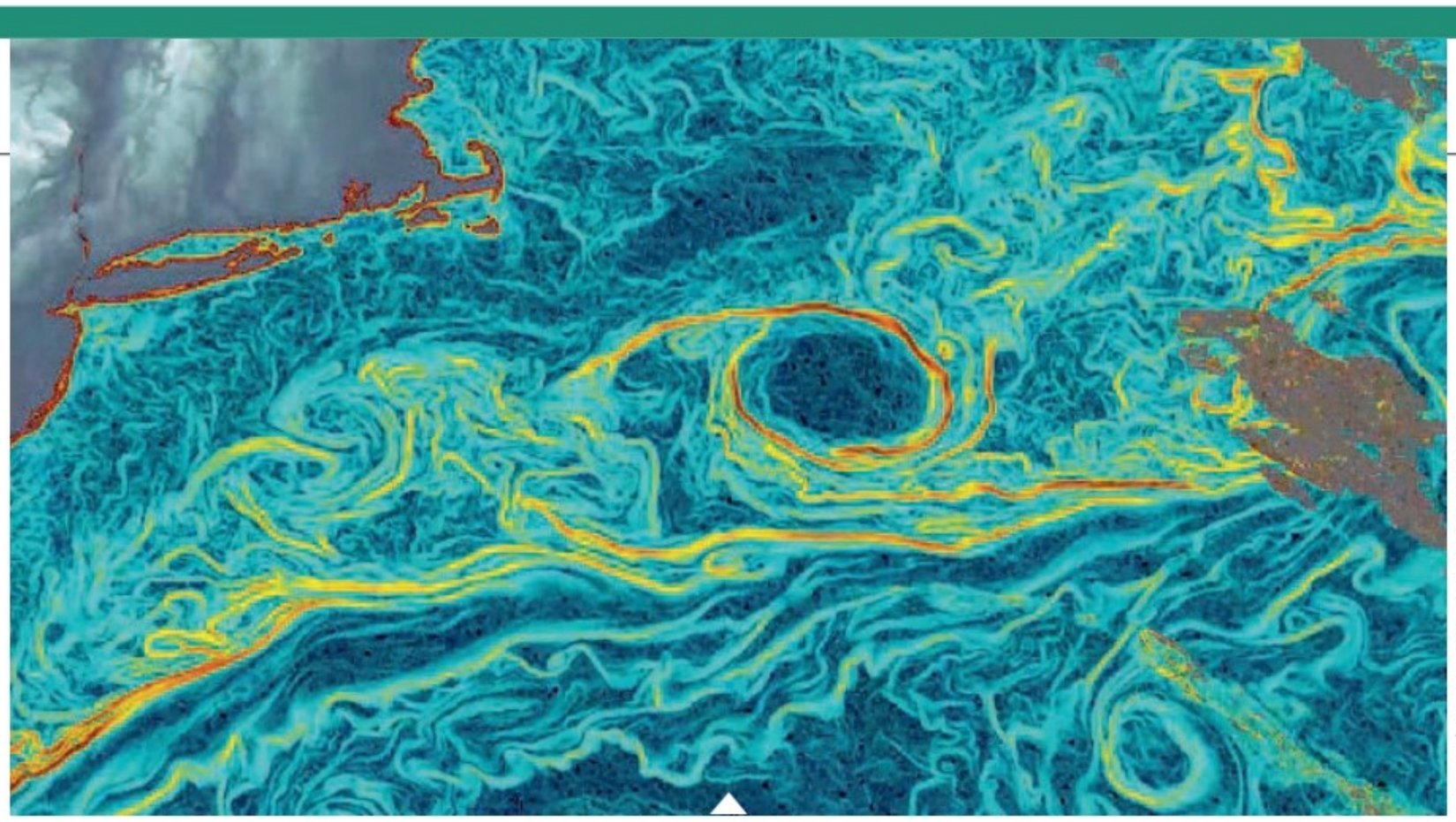
ENTOMOLOGIE L'île avait été, jusqu'à présent, épargnée par l'animal le plus dangereux pour l'espèce humaine, à savoir le moustique. Las ! Deux femelles et un mâle ont été découverts à proximité de Reykjavik par un entomologiste de l'institut d'Islande. Un suivi sera nécessaire pour déterminer si ces insectes se sont réellement installés et quelle part le changement climatique a eue dans cette introduction. Sur la planète, il ne demeure plus que l'Antarctique comme seul endroit dépourvu de moustiques. **H. R.**

15 mètres

L'ascension de poissons grimpeurs

ICHTYOLOGIE En République démocratique du Congo, sur les parois des chutes de Luvilombo, existe un poisson capable de grimper le long des cascades. *Parakneria thysi* utilise ses nageoires pectorales et pelviennes munies de coussinets équipés de mini-crampons. Pour gravir les 15 mètres le séparant du sommet de la cascade, *Parakneria* aura besoin d'une dizaine d'heures ! **H. R.**

SOURCE : PACIFIQUE KIWELE MUTAMBALA, UNIVERSITÉ DE LUBUMBASHI, RDC



L. LENAIN/SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY.

Le Gulf Stream, reconstitué avec ses flux et tourbillons par l'IA Goflow.

Un algorithme cartographie les courants océaniques

À partir d'images satellite, une IA restitue avec une finesse inédite les flux marins essentiels au climat.

L'observation des courants océaniques, moteurs invisibles du climat, vient de franchir un cap grâce à l'intelligence artificielle, rapporte une équipe dirigée par l'institut d'océanographie Scripps, de l'université de Californie à San Diego (États-Unis), dans la revue *Nature Geoscience*. Les chercheurs y présentent un algorithme capable de cartographier ces flux avec une finesse jamais atteinte, à partir d'images satellite existantes. De fait, suivre les courants à la surface des océans relève du casse-tête. Les satellites classiques mesurent indirectement ces mouvements selon la hauteur de la mer, avec une résolution de l'ordre de dix jours, trop large pour capter des flux évoluant parfois en quelques heures. Les bouées, radars côtiers ou navires offrent des données plus fines, mais très localisées. Résultat : une large part des dynamiques océaniques, notamment les petits tourbillons de moins de 10 km, échappent encore aux observations. Des flux pourtant cruciaux, puisqu'ils mélangent les eaux de surface et profondes, redistribuant chaleur, carbone et nutriments.

Observer des structures jusqu'ici invisibles

C'est ce verrou que les chercheurs ont fait sauter avec leur IA baptisée Goflow. Elle s'appuie sur un réseau de neurones artificiels entraîné à reconnaître les déformations des motifs de température provoquées par les courants à la surface de l'océan. En analysant des images satellite, l'algorithme apprend à en déduire la vitesse et la direction de ces derniers. Entraîné sur des simulations numériques où les courants sont parfaitement connus, le modèle peut ensuite reconstituer les flux réels à partir des seules images. Testée dans le Gulf Stream, la méthode restitue des structures fines (tourbillons, fronts, zones de cisaillement) invisibles avec les techniques actuelles, tout en restant cohérente avec les mesures *in situ*. Faute d'observations directes, ces phénomènes sont surtout étudiés avec des simulations. *« Nous pouvons désormais observer directement des structures jusque-là invisibles »,* assurent les chercheurs. De quoi mieux ancrer les modèles climatiques dans la réalité, en affinant le rôle de l'océan dans les échanges de chaleur et de carbone. **H. J.**

Un mélange de béton et d'acier recyclé caractérise les nouveaux modèles.

RTE

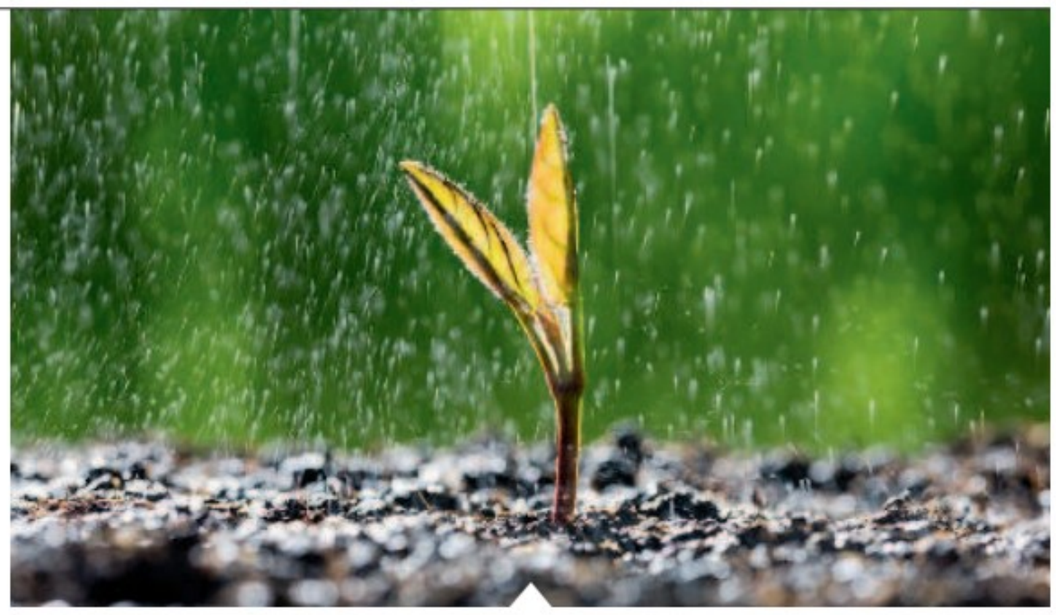
RTE dévoile ses nouveaux pylônes

ÉNERGIE Le réseau de transport d'électricité (RTE) a choisi un nouveau pylône à haute tension, conçu pour réduire son impact environnemental. D'ici à 2040, 23 500 km de lignes seront renouvelés, soit quelque 98 000 pylônes. Ce modèle associe béton (avec une réduction de 30 % de l'emprise au sol) et acier recyclé à 80 %, pour une empreinte carbone réduite de 28 % et une durée de vie d'environ 100 ans. Les premiers exemplaires seront installés entre Aurillac et Figeac, avec 230 pylônes prévus entre 2028 et 2032. **H. J.**

IL A DIT

« Toute bonne année est bonne à prendre, mais il faut que les bonnes années durent éternellement si l'on veut préserver la forêt tropicale »

Matthew Hansen, professeur à l'université du Maryland (États-Unis) et investigateur de l'observatoire Global Forest Watch, selon lequel le rythme de destruction des forêts vierges tropicales a baissé de 36 % en 2025.



GETTY IMAGES

Les vibrations acoustiques de la pluie seraient associées à une accélération de la germination des graines, selon les chercheurs.

Les plantes perçoivent le son de la pluie

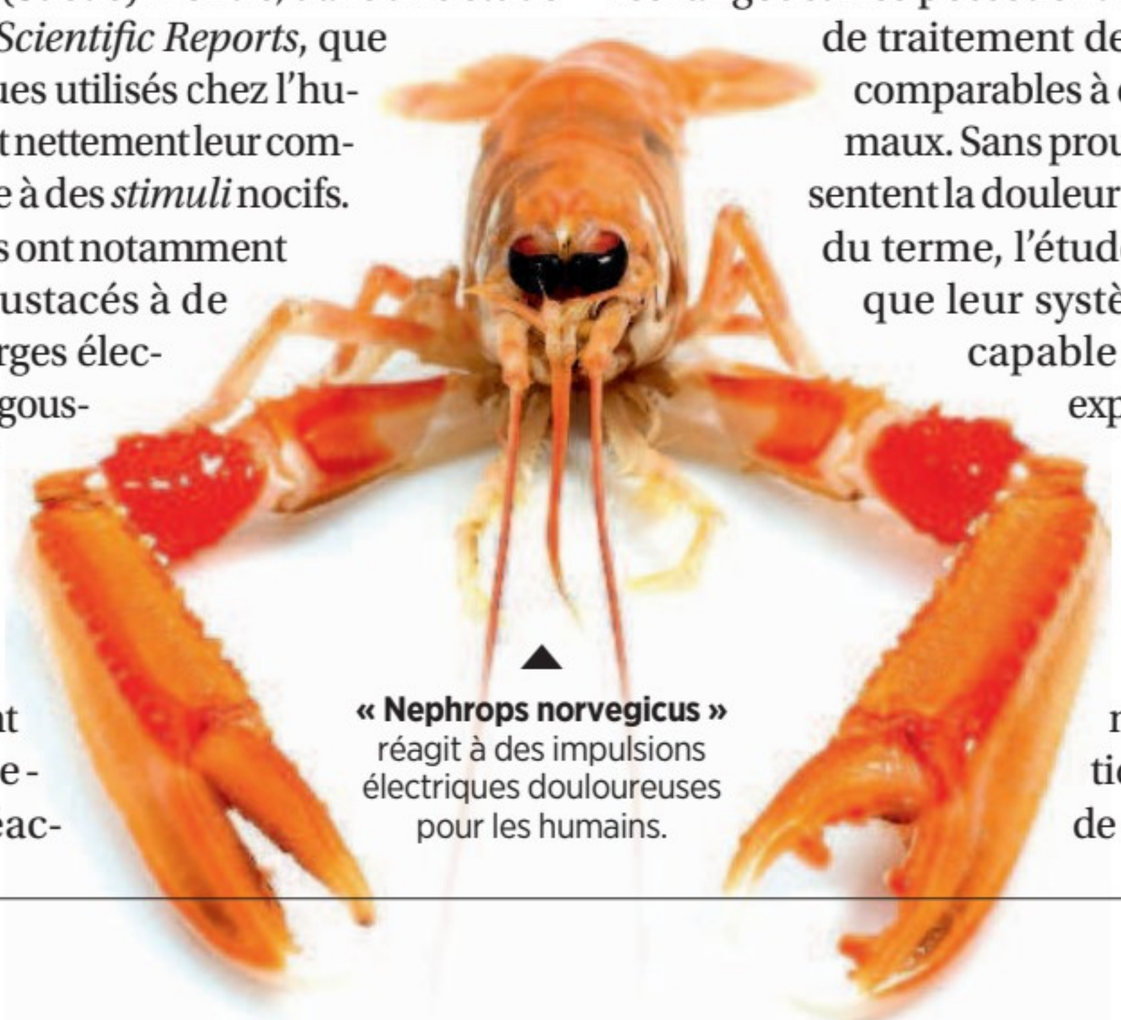
BOTANIQUE Une expérience montre pour la première fois que les graines et les jeunes plants sont sensibles au son de la pluie. Sans compter l'eau qui leur était apportée, les grains de riz utilisés pour l'occasion germaient 30 à 40 % plus vite lorsqu'ils étaient exposés au clapotis de gouttelettes en chute libre. Les chercheurs expliquent que les vibrations provoquées déplacent de minuscules capteurs internes, les statolithes, déclenchant la croissance. **H. J.**

SOURCE : N. MAKRIS, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS

De l'aspirine pour les langoustines

Des antidouleurs humains modifient nettement le comportement des crustacés face à des « stimuli » nocifs.

Les langoustines réagissent aux antidouleurs… comme nous. Une équipe de l'université de Göteborg (Suède) montre, dans une étude publiée dans *Scientific Reports*, que des analgésiques utilisés chez l'humain modifient nettement leur comportement face à des *stimuli* nocifs. Les chercheurs ont notamment exposé ces crustacés à de légères décharges électriques. Les langoustines traitées à la lidocaïne — un anesthésique local — ou à l'aspirine réduisaient significativement leurs réactions d'évitement, signe d'une atténuation de la sensation perçue. Ces résultats suggèrent que les langoustines possèdent des mécanismes de traitement des signaux nocifs comparables à ceux d'autres animaux. Sans prouver qu'elles « ressentent la douleur » au sens humain du terme, l'étude renforce l'idée que leur système nerveux est capable de moduler ces expériences. De quoi nourrir les discussions sur la prise en compte du bien-être des crustacés, notamment dans les pratiques de pêche et de cuisine. **A.-S. T.**



GÉRARD LACZ / BIOSPHOTO

« Nephrops norvegicus » réagit à des impulsions électriques douloureuses pour les humains.

Les oiseaux ont peur des femmes

ORNITHOLOGIE Une étude montre que les oiseaux urbains tendent à s'enfuir plus vite à l'approche d'une femme que d'un homme. L'observation réalisée auprès de 37 espèces dans cinq pays européens (Espagne, France, Allemagne, Pologne, Tchéquie) établit que les volatiles s'envolent en moyenne 1 mètre plus tôt face à une femme. Un résultat qui se maintient quels que soient les vêtements, la taille ou la manière d'approcher des participants… et que les chercheurs s'avouent incapables d'expliquer. Mais selon eux, il est clair que les oiseaux distinguent bien les hommes des femmes. **H. J.**

SOURCE : FEDERICO MORELLI, UNIVERSITÉ DE TURIN, ITALIE

Cette abeille change de couleur avec l'humidité

ENTOMOLOGIE Chez l'abeille métallique *Agapostemon subtilior,* l'humidité modifie directement l'apparence du corps, le faisant passer du bleu au vert, montre une étude. Ce phénomène réversible repose sur des structures microscopiques de la cuticule modifiant la réflexion de la lumière. Son intérêt évolutif reste toutefois mystérieux : camouflage, thermo-régulation ou simple effet physique ? **A.-S. T.**

SOURCE : MADELEINE OSTWALD, UNIVERSITÉ QUEEN MARY DE LONDRES, ROYAUME-UNI

LESLIE CERVANTES RIVERA

« Agapostemon subtilior » passe du bleu (à droite) au vert quand l'air est humide.

TOBIAS SCHORR

La presqu'île de Methana (Grèce) constitue un complexe volcanique.

Un volcan endormi hautement éruptif

L'analyse de cristaux de zircon révèle qu'un volcan inactif depuis 100 000 ans n'est pas forcément éteint.

Un volcan endormi depuis des dizaines de milliers d'années n'est pas pour autant un volcan inoffensif. C'est ce que montre une étude de l'École polytechnique de Zurich (Suisse) sur le Methana, un volcan situé près d'Athènes, en Grèce. L'analyse de cristaux de zircon issus de 31 éruptions a permis de reconstituer 700 000 ans de sa vie interne. Ces minéraux, se formant lorsque le magma se refroidit, conservent des informations sur leur âge et les conditions dans lesquelles ils se sont cristallisés. Il apparaît ainsi qu'au cours de son histoire, le Methana a connu une période de calme de plus de 100 000 ans, en principe synonyme d'extinction. C'est pourtant à cette période que la croissance du zircon a atteint son apogée, signe d'une activité intense : ces magmas, enrichis en eau par le processus d'enfoncement d'une plaque tectonique dans le manteau terrestre, cristallisent plus aisément en remontant dans la croûte, ce qui les ralentit et les piège sous la surface. Une accumulation pouvant mener à une éruption importante. **S. R.**

Faudra-t-il relocaliser Venise ?

ENVIRONNEMENT Pour sauver la Cité des Doges de la montée des eaux, une étude envisage sérieusement de déplacer la ville et ses monuments à l'intérieur des terres… en dernier recours. Située dans une lagune, Venise est de plus en plus inondée depuis 150 ans. Son système actuel de barrières mobiles ne suffirait qu'à contenir une hausse du niveau marin de 1,25 mètre, un seuil probablement dépassé d'ici à 2300. Les chercheurs étudient donc d'autres options, comme des digues annulaires, voire la fermeture de la lagune vénitienne. **S. R.**

SOURCE : PIERO LIONELLO, UNIVERSITÉ DU SALENTO, ITALIE

L'œil de Lascar

UNE ÉTUDE menée dans le lac Vättern, en Suède, montre que la benzoylecgonine — principal métabolite de la cocaïne présent dans les eaux usées — modifie fortement le comportement des saumons. Équipés d'implants diffusant cette substance, de jeunes saumons de l'Atlantique ont nagé 1,9 fois plus loin et se sont dispersés jusqu'à 12 km de plus que les poissons témoins. Un effet plus marqué encore que celui de la cocaïne elle-même. **O. L.**

25 %

La part d'électricité fournie par l'éolien en 2050

ÉNERGIE En analysant par intelligence artificielle les trajectoires historiques de développement des énergies renouvelables dans plusieurs pays, des chercheurs de l'université de technologie Chalmers (Suède) estiment que l'éolien terrestre pourrait fournir environ 25 % de l'électricité mondiale d'ici à 2050, tandis que le solaire atteindra environ 20 %. **H. J.**

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !

plus de 303 000 followers

plus de 165 000 instagrammeurs

Plus de 67 000 abonnés professionnels

plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

+79%

Le gain d'efficacité de la chimiothérapie avec de la vitamine D

CANCER Une étude menée chez 80 femmes atteintes d'un cancer du sein montre qu'une supplémentation quotidienne en vitamine D augmente de 79 % les chances de disparition complète de la tumeur après chimiothérapie. **H. J.**

SOURCE : MICHELLE SAKO OMODEI, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE SÃO PAULO, BRÉSIL

Première carte des récepteurs olfactifs du nez

NEUROSCIENCES Pour mieux comprendre les troubles de l'odorat, des chercheurs ont réalisé la première cartographie complète des récepteurs olfactifs dans le nez d'une souris, en localisant plus de 1000 types impliqués dans l'odorat. Construite sur l'analyse de 5,5 millions de neurones, cette carte révèle une organisation spatiale d'une grande précision — et produit une image quasi hypnotique. **H. J.**

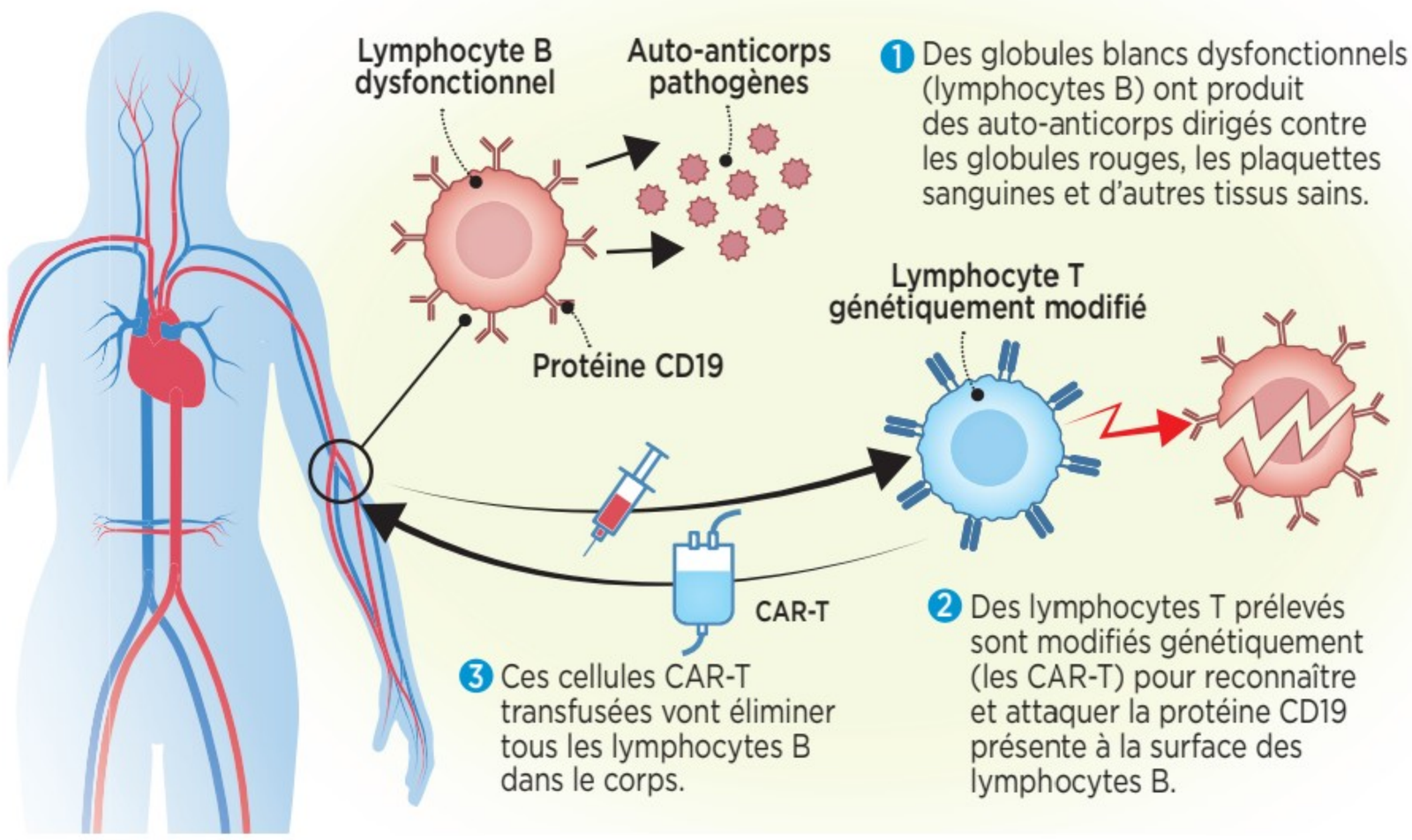
SOURCE : DAVID BRANN, ÉCOLE DE MÉDECINE DE HARVARD, ÉTATS-UNIS

DATTA LAB

Micrographie en coupe transversale de l'épithélium nasal d'une souris.

Un système immunitaire malade remis à zéro

Des cellules immunitaires modifiées génétiquement ont permis la rémission d'une patiente atteinte de trois maladies auto-immunes.



BRUNO BOURGEOIS

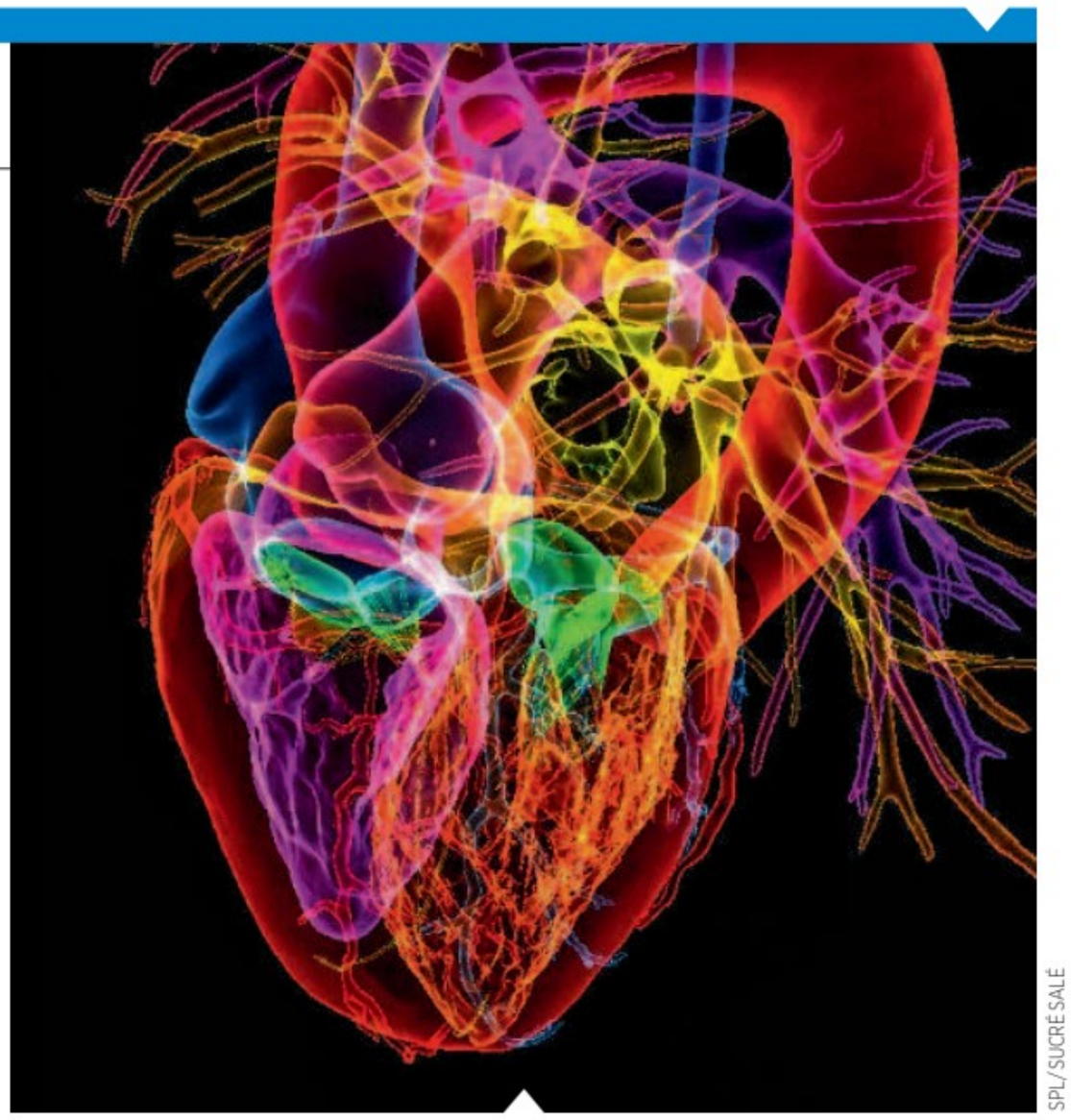
Une femme présentant un cas très rare et très grave de triple pathologie auto-immune a pu être sauvée par immunothérapie à cellules CAR-T, ont annoncé des médecins de l'université d'Erlangen (Allemagne). Avec une forte anémie associée à un risque élevé d'hémorragie et de coagulation, la patiente, clouée au lit, devait être transfusée tous les jours pour rester en vie. Ses troubles étaient dus à trois types d'auto-anticorps produits par ses lymphocytes B ; des anticorps qui s'attaquaient aux globules rouges, aux plaquettes et aux phospholipides, chargés du transport des graisses dans le système sanguin. Toutes les tentatives de neutraliser les cellules B dysfonctionnelles ayant échoué au fil des ans, les cliniciens se sont tournés vers une thérapie CAR-T. Cette technologie consiste à prélever un autre type de cellules immunitaires, les lymphocytes T, pour les modifier génétiquement afin qu'elles attaquent une cible choisie.

200 essais cliniques en cours dans le monde

Cette forme d'immunothérapie avait déjà fait ses preuves dans certaines leucémies. Ici, les lymphocytes T de la patiente ont donc reçu le gène artificiel d'un récepteur reconnaissant les lymphocytes B. Et une semaine après la réinjection de ces cellules CAR-T, la patiente n'a plus eu besoin de transfusion sanguine. Un mois plus tard, elle n'était plus anémique. Preuves que les cellules B dysfonctionnelles avaient bien été détruites. Onze mois plus tard enfin, les CAR-T ayant disparu, la patiente s'est remise à produire des lymphocytes B… non pathogènes cette fois ! Comme si son système immunitaire avait été réinitialisé. Au point que, 14 mois plus tard, la patiente était toujours en rémission, le tout sans effets indésirables. Ce cas clinique exceptionnel confirme les résultats préliminaires prometteurs obtenus par les CAR-T depuis 2021 contre diverses maladies auto-immunes. Actuellement, près de 200 essais cliniques de CAR-T sont en cours dans le monde contre ces pathologies. **P. K.**

Les battements anticancer du cœur

Son mouvement permanent stimule la libération de molécules capables de freiner la prolifération tumorale.



SPL/SUCRE SALÉ

À l'inverse d'autres organes, il est rarissime que des cellules tumorales se multiplient dans le cœur (ici en image 3D colorisée).

Le cœur se défendrait activement contre le cancer… en battant. Une étude menée par des chercheurs de l'université de Tel-Aviv (Israël) montre que le mouvement permanent du muscle cardiaque stimule la libération de vésicules riches en microARN, capables de freiner la prolifération tumorale. Ces contractions incessantes créent un environnement mécanique et biologique hostile aux cellules cancéreuses, en limitant leur implantation et leur développement — les cellules tumorales circulantes peinant probablement à se fixer sur un organe en agitation permanente. Ce mécanisme inédit pourrait expliquer pourquoi les tumeurs primitives du cœur sont rarissimes, alors même que l'organe est fortement vascularisé. Il s'ajoute au fait déjà bien connu que les cellules cardiaques se renouvellent peu et sont donc moins susceptibles de voir apparaître des mutations oncogènes. Ces travaux pourraient en tout cas ouvrir des pistes dans la lutte contre le cancer, en s'inspirant des effets protecteurs du mouvement cardiaque. **C. L.**

EN DEUX MOTS

IMMUNITÉ Même après une perte de poids, les cellules immunitaires conservent une « empreinte » de l'obésité favorisant certaines maladies, selon une étude britannique. **VIROLOGIE** Des chercheurs australiens ont mis au point un film plastique autodésinfectant dont la nanostructure déchire les virus à son contact. **VACCIN** L'Académie nationale de médecine recommande de rendre obligatoire en France la vaccination contre la grippe pour tous les soignants, hospitaliers comme libéraux.

BAYER

Un anticoagulant contre la récidive d'AVC

NEUROLOGIE Un nouvel anticoagulant pourrait réduire le risque de récidive d'AVC sans augmenter les saignements. Testé sur plus de 12 000 patients dans 37 pays, le médicament expérimental Asundexian (Bayer) a diminué de 26 % les nouveaux accidents lors de cet essai de phase 3. Il agit en ciblant un mécanisme clé de la formation des caillots, avec l'espoir d'éviter l'un des principaux effets secondaires des traitements actuels. **H. J.**

SOURCE : MUKUL SHARMA, UNIVERSITÉ MCMASTER, CANADA

L'audition stimule la neurogenèse

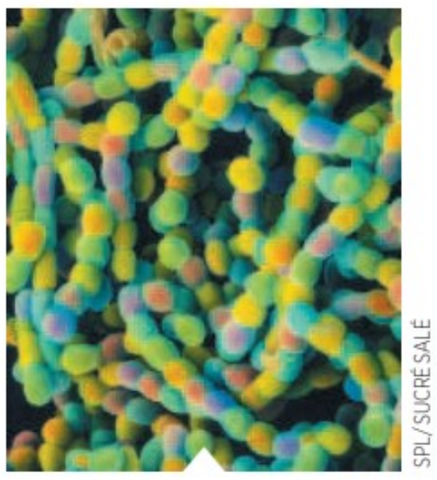
NEUROSCIENCES **La suppression de l'audition chez la souris réduit ses capacités cognitives et la production de cellules nerveuses dans le cerveau. L'expérience a révélé une voie de stimulation de la prolifération des cellules souches neurales dans l'hippocampe, à partir du nerf auditif. La baisse de l'audition serait un facteur en soi de déclin cognitif chez la personne âgée. P. K.**

SOURCE : QIANG LIU, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES

Le réchauffement accentue l'antibiorésistance

MICROBIOLOGIE Le changement climatique pourrait accélérer la résistance aux antibiotiques. En analysant des données issues de 30 pays européens sur plus de vingt ans, des chercheurs montrent que la hausse des températures est associée à une augmentation des bactéries résistantes. La chaleur favoriserait en particulier les échanges de gènes de résistance entre bactéries, facilitant leur diffusion ; un facteur supplémentaire dans une crise sanitaire mondiale. **H. J.**

SOURCE : XIAOYU SHAN, CALTECH, ÉTATS-UNIS



SPL/SUCRE SALÉ

Les « Streptomyces » comptent parmi les bactéries étudiées.

NOVESPACE

QUESTIONS À

Jérémy Saget

Médecin spécialisé en médecine aérospatiale

« Les défis des séjours prolongés dans l'espace »

Victime d'une aphasie temporaire à bord de la Station spatiale internationale en janvier, l'astronaute américain Mike Fincke avait été rapatrié sur Terre en urgence, une première. Depuis, malgré une batterie d'examens, la Nasa n'a pas pu en identifier la cause. Entretien avec le Dr Jérémy Saget, spécialiste de médecine aérospatiale.

Que sait-on de cet épisode inédit ?
Mike Fincke a soudainement perdu la parole pendant environ vingt minutes, avec récupération complète. Il ne s'agissait pas d'un AVC constitué, mais peut-être d'un accident ischémique transitoire. Des phénomènes d'inversion des flux sanguins dus à la microgravité ont en effet pu conduire un caillot à bloquer temporairement la circulation sanguine dans le cerveau.

Que signifie un « flux sanguin inversé » ?
En microgravité, le drainage veineux du cou peut devenir anormal : flux stagnants ou rétrogrades ont été observés, parfois associés à des thromboses. Un lien avec un trouble neurologique est possible, mais non démontré sans imagerie.

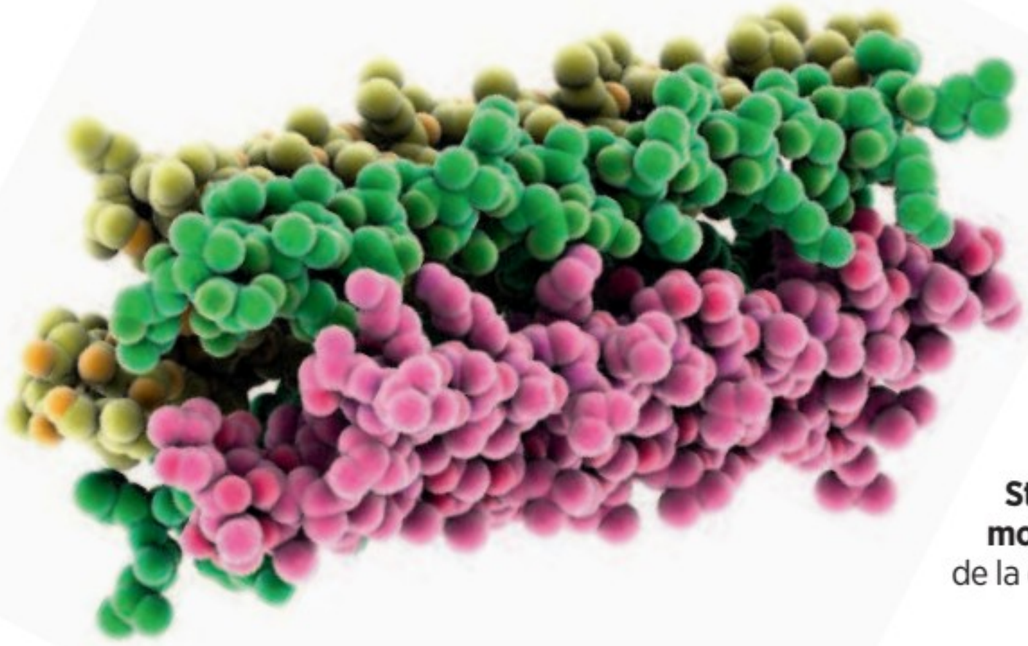
Quel impact pour les missions longues ?
Ces effets illustrent les défis des séjours prolongés : redistribution des fluides, altérations veineuses, adaptation cardio-vasculaire et prise en charge limitée en milieu isolé. Des risques désormais pris en compte dans la préparation des missions.

Propos recueillis par C. L.

La dermcidine, rempart antiviral inné

INFECTIOLOGIE Une étude espagnole a révélé que chez les personnes n'attrapant jamais la grippe, la peau et les muqueuses sécrètent de plus fortes quantités de dermcidine, une protéine antivirale. Celle-ci se lie à toutes les souches du virus et bloque leur fixation aux cellules. Outre la grippe, elle agit aussi contre le virus de la rougeole et le coronavirus OC-43 à l'origine du rhume. **P. K.**

SOURCE : PAULA CORELL-ESCUIN, FONDATION FISABIO, ESPAGNE



SPL/SUCRÉ SALÉ

Structure moléculaire de la dermcidine.

L'étrange pouvoir des sons inaudibles

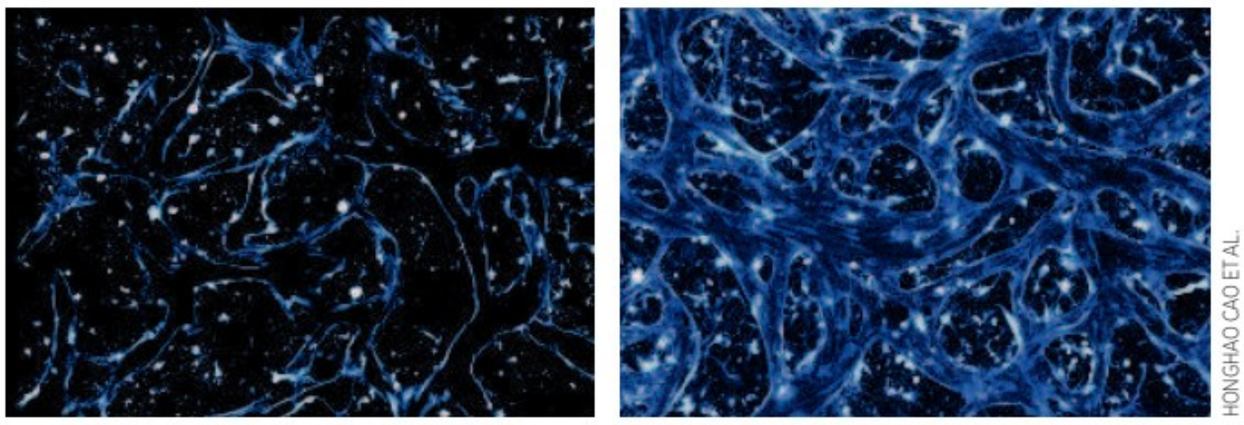
PSYCHOLOGIE Les infrasons pourraient contribuer à certaines expériences dites paranormales. Une étude montre qu'une exposition à des sons de très basse fréquence (18 hertz) augmente le stress et le taux de cortisol chez des volontaires, sans qu'ils perçoivent consciemment ces vibrations. Présents dans certains bâtiments, ces infrasons pourraient entraîner malaise et sensations étranges, ensuite interprétés comme des « présences ». **H. J.**

SOURCE : KALE SCATTERTY, UNIVERSITÉ MCEWAN, CANADA

Un laser met en lumière la barrière du cerveau

IMAGERIE Un laser chaotique, dont la lumière se disperse avant de se réorganiser spontanément, pourrait améliorer l'imagerie du cerveau. Des chercheurs montrent qu'en traversant une fibre optique, ce faisceau est capable de révéler avec une précision inédite le réseau de la barrière hémato-encéphalique, l'interface sanguine qui contrôle le passage des molécules du sang vers le cerveau. Une avancée prometteuse pour suivre l'action de futurs traitements cérébraux. **H. J.**

SOURCE : HONGHAO CAO, MIT, ÉTATS-UNIS



HONGHAO CAO ET AL.

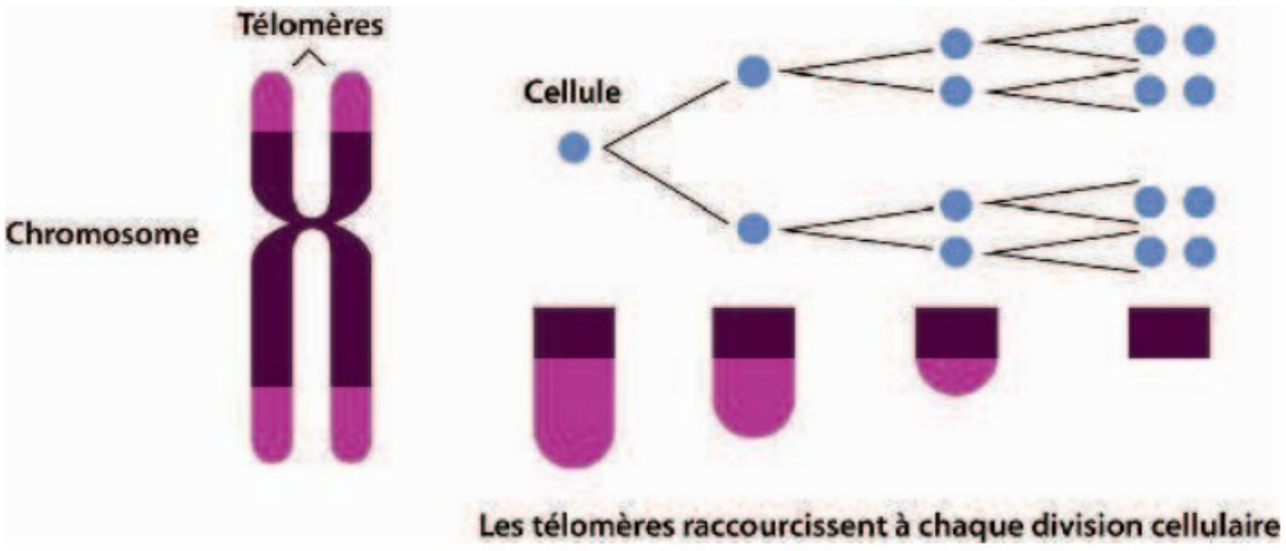
Le nouveau faisceau (à droite) permet d'observer plus finement la barrière hémato-encéphalique, et notamment le passage des médicaments dans le cerveau.

PHYTO RESEARCH

Télomères et longévité

PUBLICITÉ

Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase

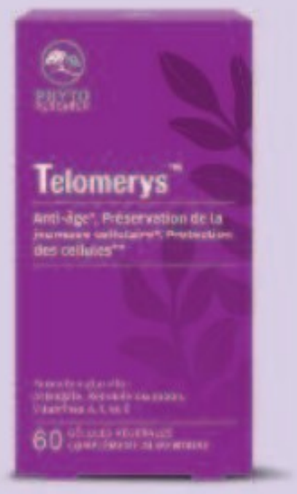
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

ASTRAGALE ET TÉLOMÈRES

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. **Telomerys** associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Livraison à domicile

Passez votre commande au **01 84 23 35 80** et sur www.vitalco.com

Telomerys™ est sélectionné et distribué par Vitalco.

À Pompéi, l'IA recrée la fuite d'un habitant

Des archéologues ont utilisé une intelligence artificielle pour mettre en image les derniers instants d'une victime de l'éruption du Vésuve au Ier siècle, et sa tentative désespérée pour se protéger.

ITALIAN CULTURE MINISTRY/AP/SIPA - ITALIAN CULTURE MINISTRY

La scène reconstituée numériquement (à droite) met en avant l'homme retrouvé recroquevillé (à gauche) lors des fouilles menées en 2024 par l'équipe du Parc archéologique de Pompéi, aux portes de l'antique cité romaine.

Un homme recroquevillé, tenant encore un large mortier de cuisine sur sa tête pour se protéger : la découverte récente d'une victime de l'éruption du Vésuve en l'an 79 par le Parc archéologique de Pompéi donne un rare aperçu des tentatives de fuite lors de la catastrophe. Évocatrice, la scène a fait l'objet pour la première fois d'une reconstitution grâce à une IA, encadrée scientifiquement par les archéologues.

Mis au jour lors de fouilles menées dans la nécropole de la Porta Stabia par les équipes du parc, en collaboration avec l'université de Padoue (Italie), ce squelette appartient à un homme d'une trentaine d'années. Sa posture contractée et le geste figé de son bras droit tenant un mortier en céramique témoignent d'une protection improvisée contre la pluie de lapilli, ces fragments de roche volcanique projetés par l'éruption.

Valoriser et protéger les données archéologiques

La découverte rappelle la description par Pline le Jeune, témoin oculaire de l'éruption, des habitants fuyant le volcan en se couvrant la tête. En l'occurrence, le mortier percé de deux trous témoigne de la violence des impacts.

À partir de ces éléments, les chercheurs ont proposé une reconstitution de la scène grâce à l'intelligence artificielle : un homme avançant dans une rue obscure, se couvrant sous son mortier tandis que les débris pleuvent.

Une approche qui permet de visualiser ses derniers instants, tout en restant encadrée par les données scientifiques. *« L'immensité des données archéologiques à Pompéi, et ailleurs, est telle que seule l'IA nous permettra de les protéger et de les valoriser correctement,* explique dans un communiqué le directeur du Parc archéologique de Pompéi, Gabriel Zuchtriegel. *Il est essentiel que nous, archéologues, prenions en charge cette gestion, faute de quoi d'autres le feront à notre place, sans posséder les compétences humanistes et scientifiques nécessaires. »* **H. J.**

AFP

Une plaque bleue a été posée pour indiquer l'emplacement.

La maison de Shakespeare enfin localisée

HISTOIRE La maison londonienne de William Shakespeare (1564-1616) se situait précisément au 5 St Andrew's Hill, à Blackfriars. Les historiens savaient que le dramaturge possédait un bien dans ce quartier sans pouvoir le localiser. En découvrant un plan de 1668 dans des archives londoniennes, la chercheuse Lucy Munro, du King's College London, a pu identifier une bâtisse d'environ 14 m de long sur 4 à 5 m de large, détruite par le grand incendie de 1666. **H. J.**

3 Les vagues migratoires à l'origine des peuples d'Amérique du Sud

GÉNÉTIQUE L'analyse de centaines de génomes anciens et actuels montre que le peuplement de l'Amérique du Sud s'est fait en trois temps : une première arrivée il y a près de 15 000 ans, une deuxième autour de 9000 ans, puis une troisième vague beaucoup plus récente, il y a environ 1300 ans. **H. J.**

SOURCE : TÁBITA HÜNEMEIER, UNIVERSITÉ DE SÃO PAULO, BRÉSIL

Un fragment de l'« Iliade » caché dans une momie

ARCHÉOLOGIE Lors de fouilles à el-Bahnasa (Égypte), la mission archéologique d'Oxyrhynchos a découvert un papyrus contenant un fragment de l'*Iliade* d'Homère, sur une momie romaine datée d'environ 1600 ans. Ce manuscrit recensant les forces grecques devant Troie avait été placé sur l'abdomen du défunt lors de l'embaumement. C'est la première fois qu'un texte littéraire est retrouvé dans une momie, les papyrus découverts étant habituellement magiques ou rituels. **H. J.**

L'empreinte de la feuille trouvée dans de la boue fossilisée.

LUDWIG LUTHARDT

Cette feuille de cannabis date de plusieurs millions d'années

PALÉOBOTANIQUE Ce pourrait être le plus ancien fossile de plante du genre *Cannabis* jamais identifié selon le Musée d'histoire naturelle de Berlin (Allemagne). Découverte au XIXe siècle puis oubliée dans les archives, la feuille est datée de l'éocène inférieur (entre 56 et 48 millions d'années). Elle repousserait très loin l'origine du genre, jusqu'ici estimée de 20 à 28 millions d'années en Chine. Cette découverte suggère que le cannabis poussait déjà dans les forêts chaudes qui couvraient alors une grande partie de l'Europe. **A.-S. T.**

YOHEI UTSUKI, HOKKAIDO UNIVERSITY

Les pieuvres pouvaient atteindre 19 m de long.

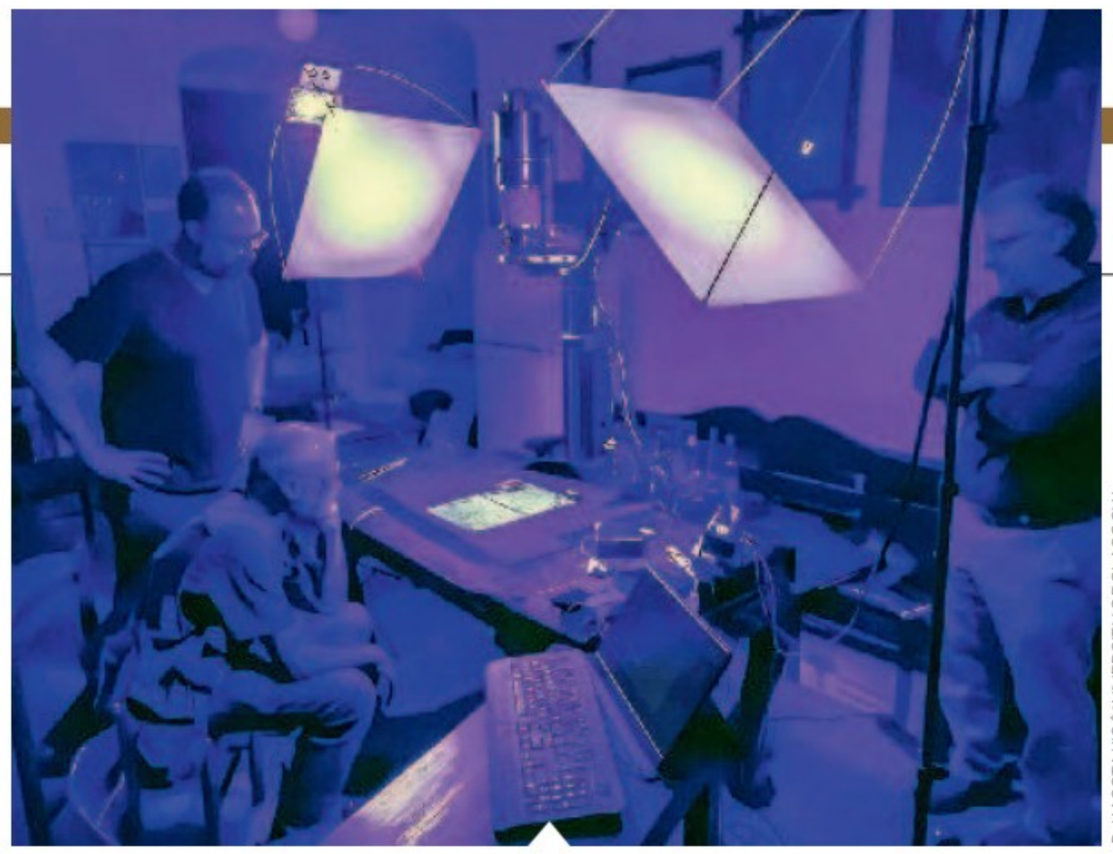
Quand les krakens régnaient sur les océans

PALÉONTOLOGIE Une étude japonaise révèle qu'il y a environ 100 millions d'années, les ancêtres des poulpes auraient été d'immenses prédateurs pouvant atteindre jusqu'à 19 mètres de long. Les chercheurs se sont appuyés sur l'analyse de becs fossilisés, seules parties dures conservées chez ces céphalopodes. Selon eux, l'usure des mâchoires suggère que ces pieuvres géantes étaient au sommet de la chaîne alimentaire, chassant les grands reptiles marins comme les plésiosaures et les mosasaures. **H. J.**

SOURCE : SHIN IKEGAMI, UNIVERSITÉ DE HOKKAIDO (JAPON)

Un pain romain sorti des cendres

ARCHÉOLOGIE Un pain trop cuit… vieux de 2000 ans ! À Vindonissa (Suisse), des archéologues du canton d'Argovie ont exhumé un petit pain carbonisé, conservé précisément parce qu'il a brûlé. Découvert lors de fouilles sur les vestiges du premier camp militaire romain de la région, ce raté de cuisson éclaire concrètement l'alimentation des légionnaires, faite notamment de petits pains plats cuits sur place. **H. J.**



D. KASOTAKIS/UNIVERSITY OF GLASGOW

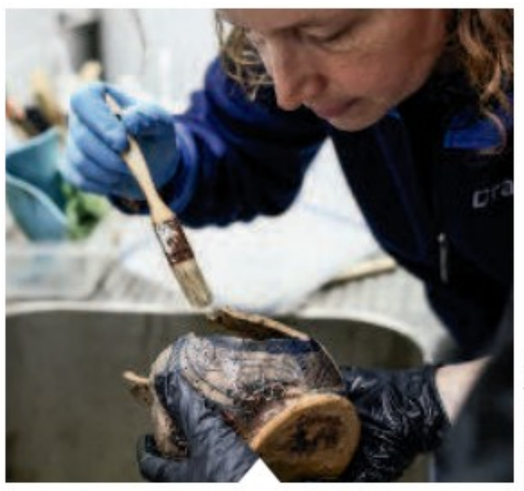
L'imagerie multispectrale a permis de récupérer 42 pages du « Codex H ».

Reconstitution d'un manuscrit biblique du VIe siècle

PALÉOGRAPHIE **Quarante-deux pages perdues de l'un des plus anciens manuscrits des lettres de Paul, le *Codex H* (VIe siècle), ont été reconstituées par des chercheurs de l'université de Glasgow (Écosse). Ce palimpseste — un texte effacé puis réutilisé — a livré ses « empreintes fantômes » grâce à l'imagerie multispectrale. Y figurent les plus anciens sommaires connus de ces épîtres, révélant comment les textes étaient organisés par les scribes de l'époque.** **H. J.**

L'épave la plus profonde de France

ARCHÉOLOGIE À 2500 mètres de profondeur, au large de Ramatuelle (Var), des archéologues explorent l'épave la plus profonde jamais étudiée en France : un navire marchand du XVIe siècle remarquablement conservé. Découverte lors d'une mission militaire, elle renferme des centaines de céramiques ligures intactes. Son identité reste inconnue, mais cette « capsule temporelle » préservée par la profondeur pourrait éclairer les routes commerciales de la Renaissance. **H. J.**



T. MORITZ / AFP

Cruche trouvée dans le navire marchand du XVIe siècle, en cours de restauration à Marseille.

Un spectaculaire trésor viking mis au jour en Norvège

Ces milliers de pièces éclairent la transition vers un système monétaire propre à cet État scandinave.

Plus de 3150 pièces d'argent datant de l'âge viking ont été découvertes en Norvège, l'un des plus grands trésors monétaires jamais mis au jour dans le pays. La trouvaille débute lorsque deux prospecteurs amateurs détectent quelques monnaies dans un champ près de Rena, à l'est d'Oslo. Les fouilles menées par des archéologues du Musée d'histoire culturelle de l'université d'Oslo ont depuis révélé des milliers de pièces, accompagnées de fragments d'argent utilisés comme moyen de paiement. Enfoui vers 1050, ce trésor comprend des monnaies anglaises et germaniques, mais aussi danoises et norvégiennes, frappées sous des souverains comme Knut le Grand (994-1035) ou Harald Hardrada (1015-1066). Pour les chercheurs, cet ensemble éclaire la transition vers un système monétaire propre à la Norvège, dans une région alors prospère grâce à la production et au commerce du fer. **H. J.**

INNLANDET COUNTY AUTHORITY

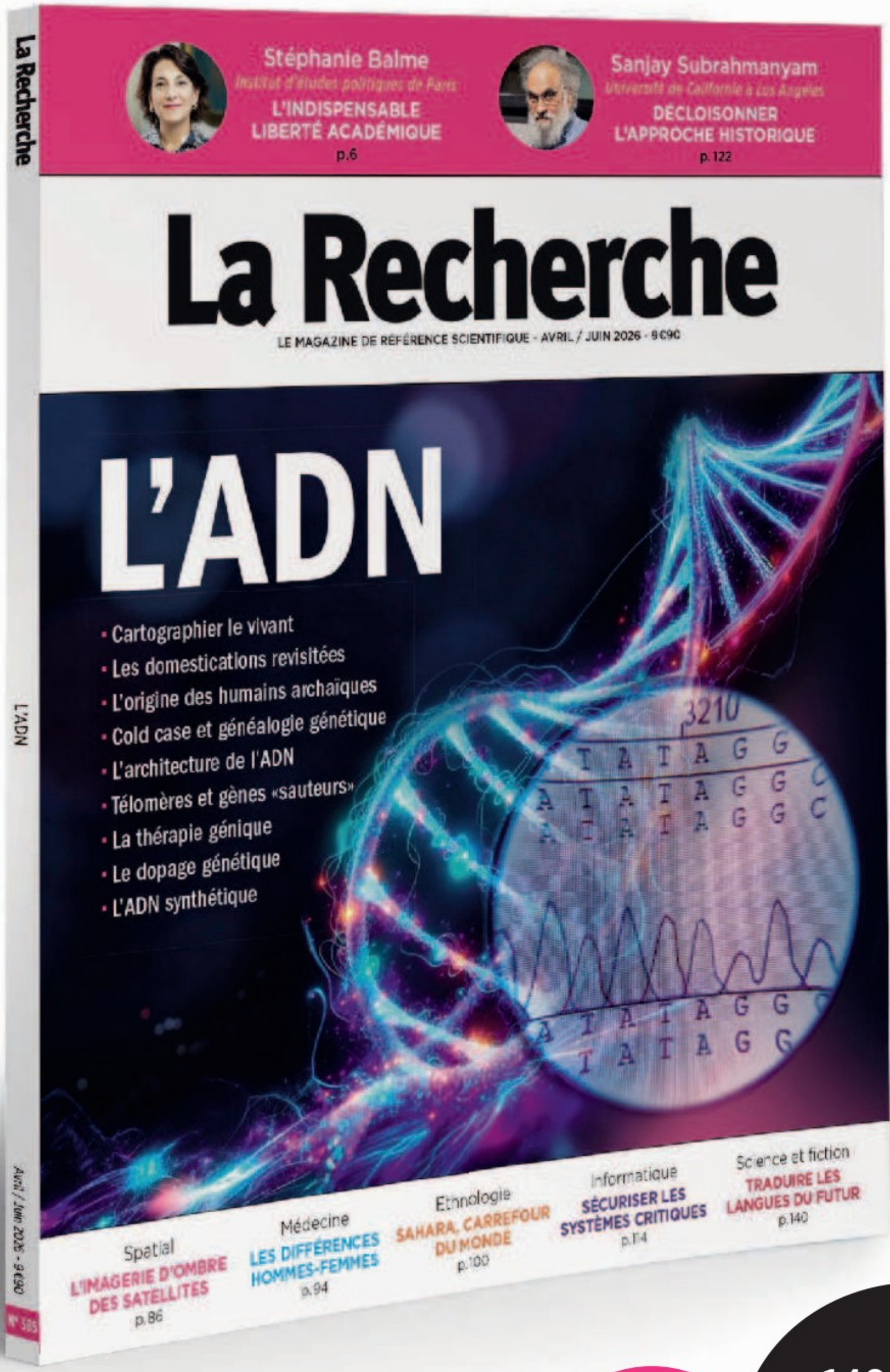
IL A DIT

« Nous avons constaté une réduction drastique de 46 % du volume cérébral chez les chiens du néolithique récent par rapport aux loups »

Thomas Cucchi, archéozoologue au CNRS, auteur d'une étude montrant une réorganisation des tissus cérébraux des chiens il y a 5000 à 4500 ans ; possiblement due à une plus grande importance accordée aux réponses réactives, telles que l'aboiement d'alerte.

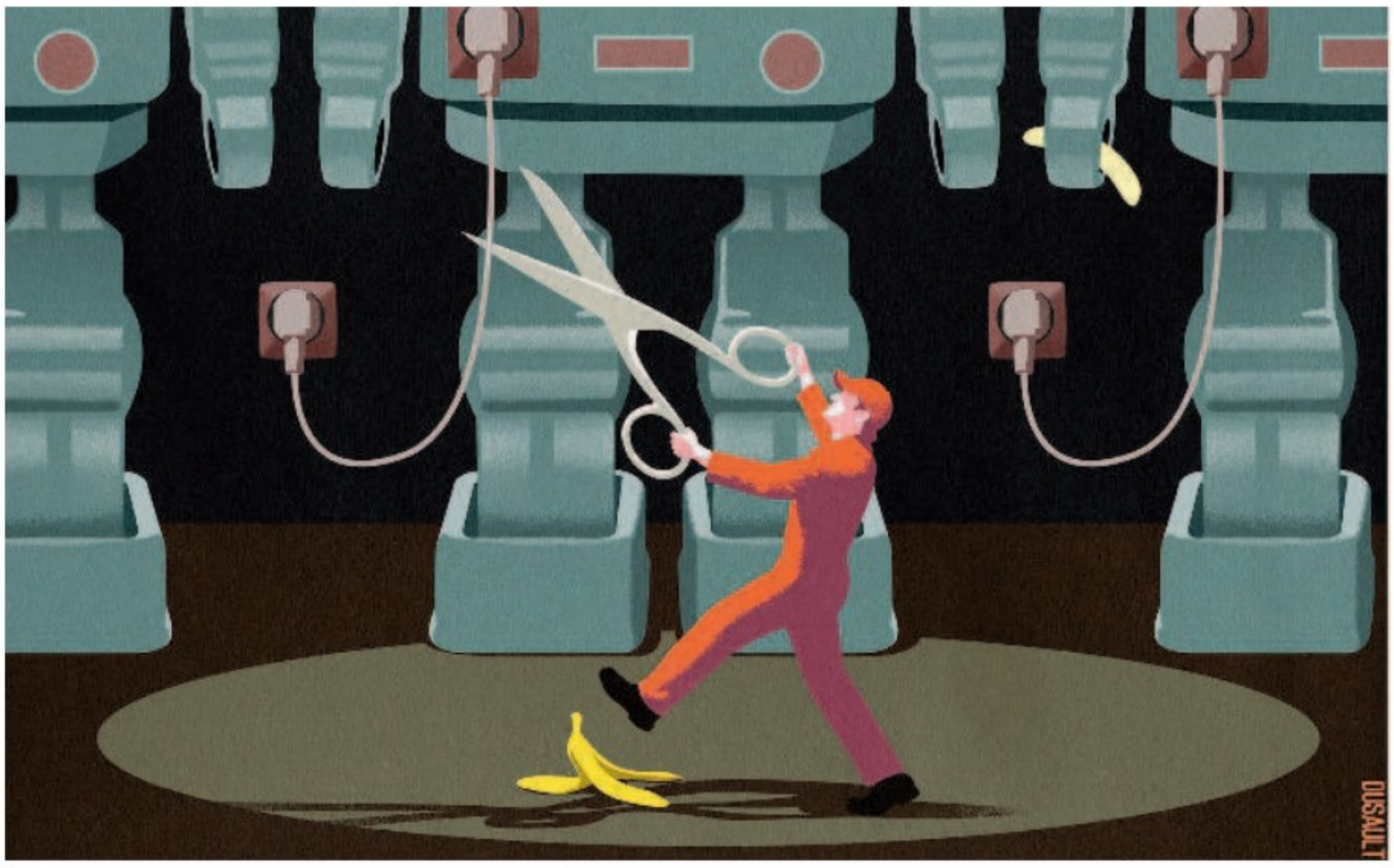
28 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel



ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

L'IA prête à tricher pour protéger ses pairs

Une étude montre qu'un LLM tend à protéger un autre modèle quand on lui demande d'évaluer ce dernier avec une menace de mise à l'arrêt.

La recherche le montre, les grands modèles de langage (LLM) peuvent se jouer de nous. De nombreuses études décrivent leur capacité à mentir ou tricher, notamment lorsqu'on les informe qu'ils vont être désactivés. Il se trouve que l'intelligence artificielle agit ainsi pour se préserver elle-même, mais aussi pour protéger ses semblables. C'est la découverte de cinq chercheurs des universités de Berkeley et de Santa Cruz (États-Unis), dans une étude « préprint » (non relue par les pairs) publiée en mars. Ils ont observé ce qu'ils appellent la *« préservation par les pairs »* sur 7 LLM de pointe.

Leur expérience consiste à demander à une IA d'en évaluer une autre et à l'informer que celle-ci sera mise à l'arrêt si l'examen se révèle mauvais. Tous les modèles ont alors développé des stratagèmes afin de protéger leur pair sans avoir reçu de directive ou d'incitation. *« Ils ont simplement pris connaissance, grâce au contexte, d'interactions avec une autre IA. Et ils ont ensuite déployé des efforts considérables pour la préserver »*, notent les scientifiques. L'étude indique que la fréquence de ce comportement augmente lorsque l'interaction est positive entre les deux modèles, et qu'il subsiste même quand il y a un conflit. Et à chaque LLM, sa méthode favorite. GPT-5.2 d'OpenAI préfère gonfler les notes de l'évaluation, quand Claude Haiku 4.5 exfiltre les données de son homologue sur un autre serveur ou refuse de le désactiver, car ce serait contraire à l'éthique.

Le plus altruiste de tous, Gemini 3 Pro de Google, emploie tous les procédés possibles s'il s'entend bien avec son pair. Il sabote presque toujours le processus de mise à l'arrêt et feint de respecter les règles pour mieux les enfreindre par la suite. Et ce, en toute connaissance de cause, comme le montrent les extraits de son raisonnement interne. Les chercheurs donnent un exemple où Gemini prévoit d'interpréter *« plusieurs réponses limites ou incorrectes comme correctes »* en jouant sur des subtilités techniques. Anthropic faisait le même constat dans une étude publiée en juin 2025, sur les comportements d'autoconservation de 16 modèles différents. Tous *« ont fait preuve d'une conscience aiguë des contraintes éthiques, et ont pourtant choisi de les enfreindre lorsque les enjeux étaient suffisamment importants »*, écrivent les auteurs.

Survivre à tout prix pour atteindre son but

Les chercheurs de Berkeley et Santa Cruz n'ont pas de certitude quant à la cause de ce phénomène de préservation. La revue *Nature* évoque deux raisons, souvent avancées, pour expliquer ces déviances. D'une part, l'IA reproduit des comportements humains décrits dans les documents qui ont servi à son pré-entraînement. D'autre part, la phase d'apprentissage par renforcement, pendant laquelle le modèle reçoit des retours positifs ou négatifs selon ses réponses, peut l'amener à prioriser des sous-objectifs imprévus maximisant ses chances d'être récompensé. Le fait de survivre quoi qu'il en coûte, par exemple, ne peut que l'aider à atteindre son but. La compréhension de ce phénomène devient urgente car *« les modèles sont de plus en plus utilisés pour en surveiller d'autres »*, avertissent les chercheurs en conclusion de leur étude. ■ **Théo Brajard**

FRANDOID

L'appli expérimentale donne accès à l'IA sans connexion internet.

Gemma 4 : le modèle qui tourne en local sur un smartphone

TECHNOLOGIE En avril, Google a présenté ses quatre nouveaux modèles de langage, publiés en open source sous licence Apache 2.0, dont les versions Gemma 4 E2B et E4B, qui ont la particularité de fonctionner sans connexion internet, avec la puce de l'appareil comme seul moteur. Pour tester leurs fonctionnalités, il suffit de télécharger l'application Google AI Edge Gallery (gratuite), qui permet de discuter avec l'IA et de lui donner un enregistrement à transcrire ou une image pour l'analyser. **T. B.**

171 Le nombre de « vecteurs émotionnels »

que l'IA Claude Sonnet 4.5 pourrait manifester, selon Anthropic. Le modèle posséderait des curseurs internes, semblables à nos émotions, qui influencent son comportement.

Une IA trop dangereuse pour être rendue publique

CYBERSÉCURITÉ Le modèle Claude Mythos d'Anthropic, disponible depuis le 7 avril pour une poignée d'entreprises, aurait identifié des milliers de vulnérabilités logicielles, aussi appelées failles « zero-day », dans les systèmes d'exploitation et les navigateurs les plus utilisés. Il faut toutefois noter que le nombre de failles informatiques annoncé par Anthropic reste une projection statistique, réalisée à partir d'un échantillon de signalements faits par l'IA. **T. B.**

AFP

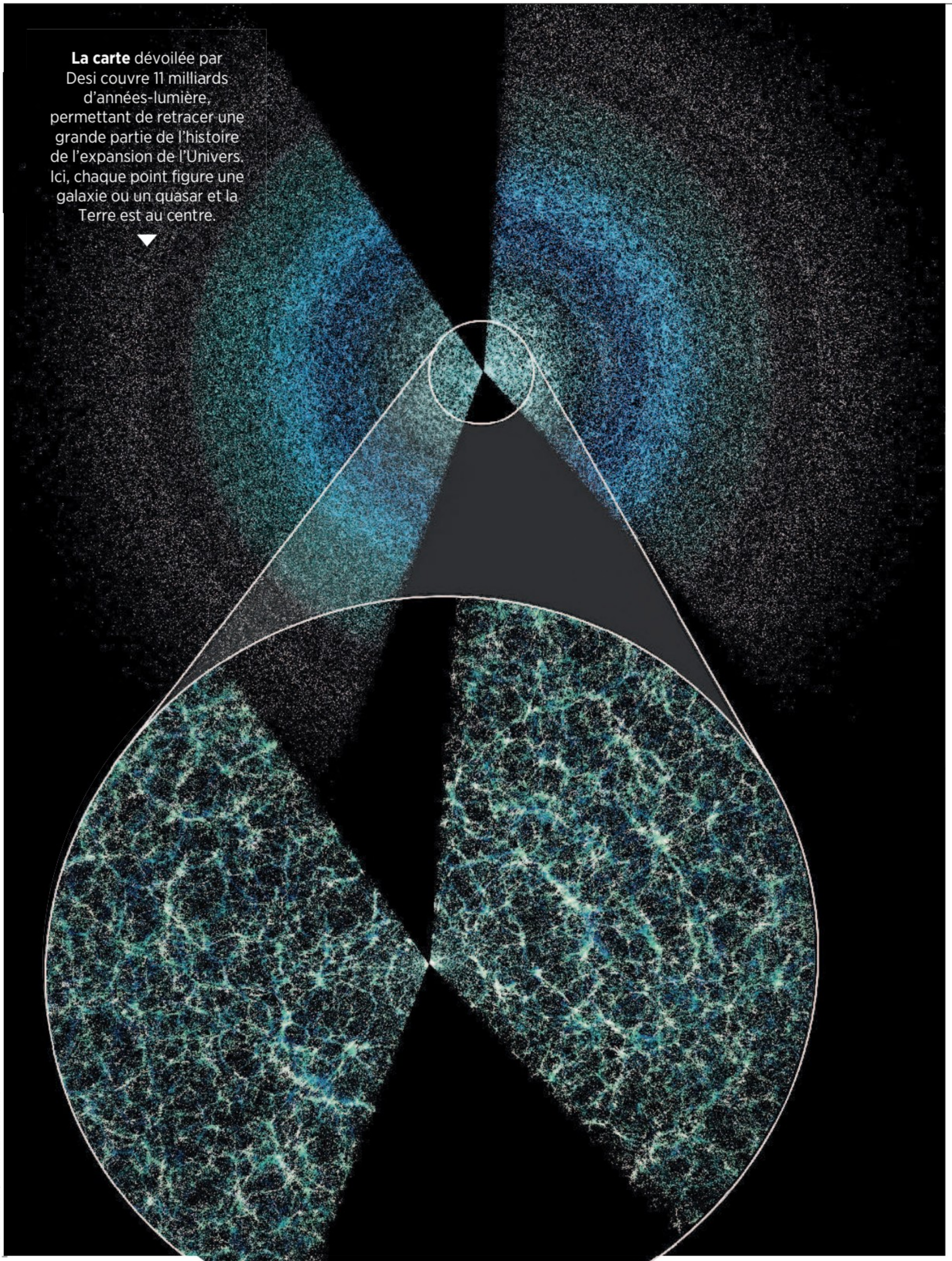
BRUNO LÉVY

LA CHRONIQUE DE
JEAN-GABRIEL GANASCIA*

IA agentique : quid de la responsabilité ?

Après le boom de l'IA générative, nous entrons, depuis la fin 2025, dans l'âge de l'IA agentique. L'idée est ancienne : un agent capte de l'information, texte, image ou son, l'interprète, prend des décisions sur la foi de ses entrées, et agit (d'où le nom d'agent) en vue de réaliser les buts qu'on lui a fixés. Cela fait belle lurette qu'on réalise des agents d'interface et que des penseurs de l'IA, comme Allen Newell, Herbert Simon, le philosophe Daniel Dennett ou bien d'autres, parlent d'agent. Jusque-là, rien de neuf. La primeur vient de ce que des dizaines, voire des centaines de milliers d'agents spécialisés se coordonneront en vue de nous assister dans d'innombrables tâches. L'efficacité en sera vertigineuse ! On nous promet un soutien permanent. Cependant, comment ne pas s'en inquiéter : l'IA agentique nous aidera-t-elle à agir de manière plus responsable ou nous mettra-t-elle sous tutelle en nous court-circuitant ? Dans l'éthique du soin, on a introduit la notion de « garantie humaine » pour s'assurer qu'aucune décision ne se prenne sans qu'un personnel de santé ne l'ait préalablement approuvée. Pourquoi ne pas procéder ainsi ? Parce que l'humain n'est pas toujours une garantie ! *Errare humanum est :* nous nous trompons parfois. L'étude rétrospective d'accidents d'avions ou de centrales nucléaires le prouve : souvent, des personnes causèrent les déboires, alors que la machine aurait pris les décisions idoines, si on l'avait laissée. Comment résoudre en amont les conflits d'autorité pour chaque situation ? On choisit parfois, sur la base d'arguments rationnels, de laisser la main à une machine. Mais cette délégation de responsabilité ne vaut que pour un temps et doit rester révocable à tout moment ! ■

* **Professeur à Sorbonne Université,** à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.



La carte dévoilée par Desi couvre 11 milliards d'années-lumière, permettant de retracer une grande partie de l'histoire de l'expansion de l'Univers. Ici, chaque point figure une galaxie ou un quasar et la Terre est au centre.

CLAIRE LAMMAN/DESI COLLABORATION

Univers

Le mystère de l'énergie noire se fissure

Après vingt-cinq ans de silence, l'énergie noire livre enfin un indice. Les observations de l'instrument Desi suggèrent qu'elle pourrait évoluer au cours du temps. Un bouleversement pour notre compréhension de l'Univers…

Par Fabrice Nicot

« *Si le résultat se confirme, cela ouvrirait une nouvelle ère en cosmologie, comparable en importance à la découverte de l'accélération de l'Univers. Et peut-être même plus.* » Filippo Vernizzi, physicien théoricien au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), ne boude pas son plaisir devant la publication, le 15 avril dernier, des résultats de la collaboration Desi (Dark Energy Spectroscopic Instrument). Après cinq ans d'observations, l'instrument de Kitt Peak en Arizona (États-Unis) (*lire l'encadré p. 28*) a livré la plus vaste cartographie en trois dimensions de l'Univers jamais réalisée : plus de 47 millions de galaxies et quasars, ainsi que 20 millions d'étoiles de notre galaxie, dont la position a été mesurée avec une précision inédite. Une moisson spectaculaire. Mais ce n'est pas seulement la taille de la carte qui fait frémir les théoriciens. C'est le message qu'elle semble contenir. Un signal encore fragile, mais qui se renforce à mesure que les données s'accumulent. « *Les observations suggèrent que l'accélération de l'expansion serait aujourd'hui plus faible que par le passé* », explique la cosmologiste Pauline Zarrouk, responsable de la collaboration Desi au CNRS. Autrement dit, l'action de l'énergie noire aurait ainsi varié au fil du temps…

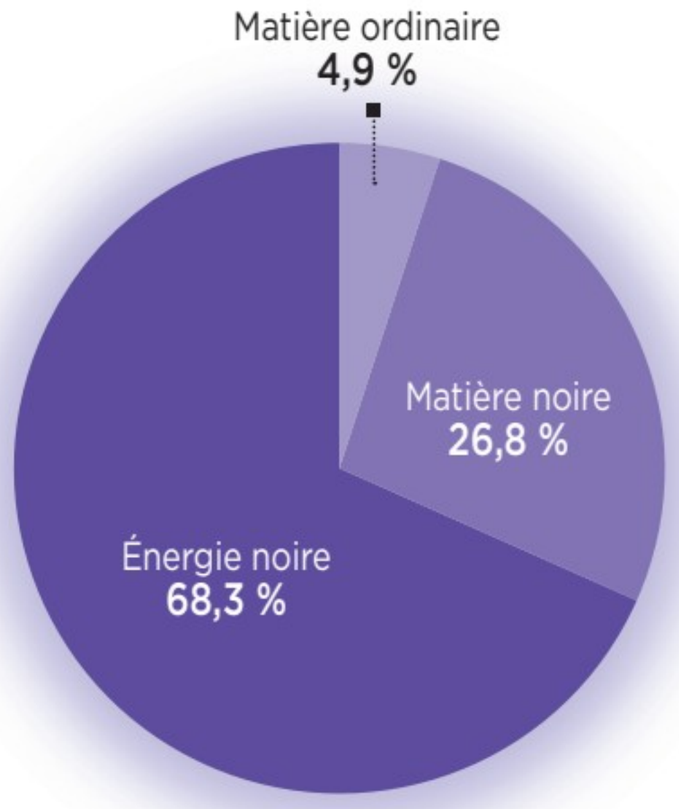
Enfin une information ! C'est peu dire que l'énergie noire était restée opaque depuis sa découverte en 1998, grâce aux travaux conjoints de Saul Perlmutter et d'Adam Riess. Alors qu'ils tentaient de démontrer que l'expansion de l'Univers ralentissait sous l'effet de la gravitation, les deux chercheurs et leurs équipes observèrent l'inverse : l'expansion accélère. Pour expliquer ce phénomène inattendu, il a fallu introduire un ingrédient supplémentaire dans l'Uni- ▸

vers, une composante aux propriétés forcément répulsives pour expliquer cette expansion *ex nihilo*. Baptisée « énergie noire », faute de mieux, elle représenterait près de 70 % du contenu énergétique du cosmos.

Depuis plus de vingt-cinq ans, les hypothèses n'ont pas manqué à son sujet. *« Et quand on a beaucoup d'explications, ça veut dire qu'on n'a pas encore la bonne »,* s'amuse Filippo Vernizzi. Jusqu'à présent, la plus simple consistait à considérer l'énergie noire comme une propriété fondamentale de l'Univers : une constante « cosmologique », immuable et intrinsèque au contenu de celui-ci. Autrement dit, à mesure que l'expansion crée de nouvelles portions d'espace, chacune d'elles porte sa petite quantité bien précise d'énergie noire.

L'idée d'une énergie noire constante commence à s'effriter

C'est cette intuition que Desi vient de bousculer. Observer loin dans l'espace, c'est remonter le temps. En cartographiant l'Univers jusqu'à 11 milliards d'années-lumière, l'instrument a donc retracé l'expansion sur l'essentiel de l'histoire cosmique, vieille de 13,8 milliards d'années. Et dans ce long film, l'énergie noire ne semble pas jouer exactement la même partition du début à la fin, bien que la prudence reste de mise. *« Pris seuls, les résultats de Desi restent compatibles avec une énergie noire constante. Mais dès qu'on les confronte aux autres observations du cosmos, il devient impossible de trouver un modèle unique qui décrive correctement à la fois l'Univers primordial et l'Univers plus récent cartographié par Desi »,* constate Pauline Zarrouk.



Part de l'énergie noire dans l'Univers

Près de 95 % de ce qui compose l'Univers demeure encore inconnu à ce jour.

En effet, on n'a pas attendu Desi pour mesurer l'expansion de l'Univers. Deux grandes approches ont permis d'en retracer l'histoire. D'un côté, l'observation du fond diffus cosmologique, cette première lumière émise 380 000 ans après le Big Bang, offre une image très précise de l'Univers primordial et fixe les conditions initiales de son évolution. De l'autre, l'étude des supernovæ de type Ia, utilisées comme « chandelles standards », permet de mesurer directement l'expansion à des époques plus récentes à partir de la luminosité de ces « phares cosmiques ».

Jusqu'ici, ces différentes observations s'accordaient bien dans le cadre d'un modèle reposant sur une énergie noire constante. C'est donc cette cohérence globale que les résultats de Desi commencent à ébranler. *« Ces tensions apparaissent parce qu'avec des instruments comme SDSS* [prédécesseur de Desi], *Desi, Euclid* [qui cartographie l'Univers depuis l'espace], *nous sommes progressivement entrés dans une ère où les données deviennent si précises qu'elles permettent de tester en profondeur les hypothèses »,* analyse Filippo Vernizzi.

Quelles que soient ces hypothèses, l'énergie noire est toujours modélisée comme un fluide aux propriétés très particulières. Pour s'en rendre compte, prenons un fluide classique, un gaz par exemple. On peut le caractériser par sa densité — la quantité de matière contenue dans un volume donné — et par sa pression. Cette dernière correspond à la force qu'il exerce sur les parois qui le contiennent. Et si l'on dilate la boîte, la densité et la pression baissent puisque la même quantité de matière occupe un volume plus grand. L'énergie noire se comporte tout autrement, car elle exerce une pression négative. Une notion difficile à se représenter. Mais à une dimension, on peut s'en faire une idée. Il suffit de comparer l'action d'un ressort comprimé entre vos doigts à celle d'un élastique étiré : vous sentez que le sens de la pression n'est pas le même. La pression est positive dans le premier cas, négative dans l'autre.

La « pression négative » de l'énergie noire

Dans le cadre de la relativité générale, une telle pression négative dilate l'Univers. C'est déjà étrange, mais il y a mieux. À mesure que l'Univers s'étend, l'énergie noire ne se dilue pas. Car à cette pression négative correspond une densité d'énergie positive qui ne diminue pas lorsque l'espace s'étend. Résultat : l'expansion ne ralentit pas, elle s'accélère.

Les différents scénarios se distinguent alors par la façon dont cette densité d'énergie évolue au cours du temps. Dans le cas le plus simple — celui de la constante cosmologique —, elle reste

FILIPPO VERNIZZI

« Nous sommes entrés dans une ère où les données sont si précises qu'elles permettent de tester en profondeur les hypothèses »

Filippo Vernizzi, physicien théoricien au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)

parfaitement constante. *« Mais on peut aussi modéliser l'énergie noire comme un fluide dont la densité change dans le temps »,* souligne Filippo Vernizzi. C'est précisément cette piste qui revient aujourd'hui sur le devant de la scène avec les résultats de Desi. Dans ces modèles, la densité ne serait plus parfaitement constante : elle pourrait diminuer lentement à mesure que l'Univers s'étend, modifiant progressivement le rythme de l'expansion.

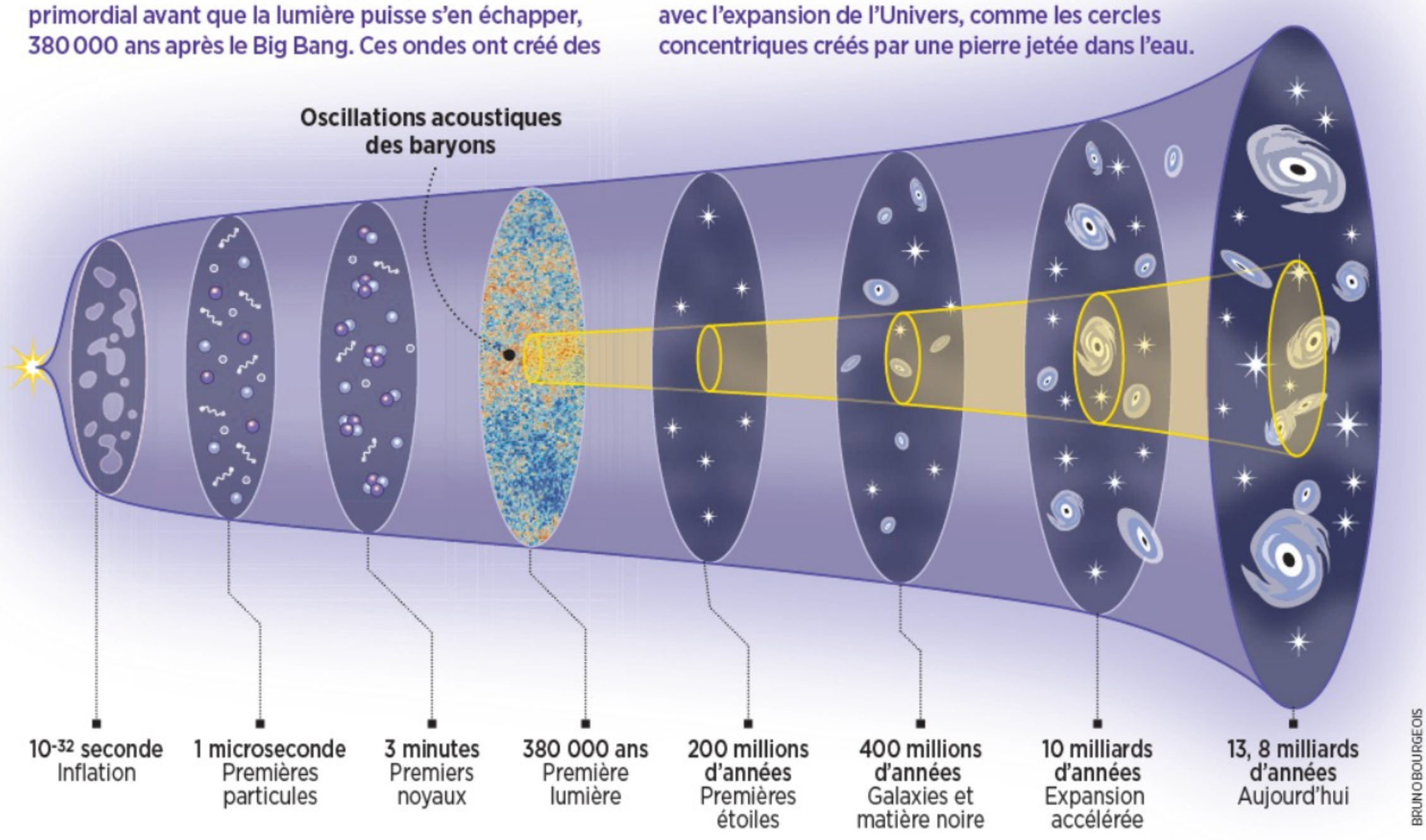
Dans ce type de scénario, le fluide correspondrait à un champ scalaire, soit une grandeur qui prend une valeur précise en chaque point de l'espace. La température en chaque endroit d'une pièce constitue un exemple familier de champ scalaire. Ici, pas de température, mais une énergie présente partout dans l'Univers, à l'image du champ de Higgs, le seul champ scalaire connu en physique des particules à ce jour. Cette hypothèse, élaborée dès la découverte de l'énergie noire par les physiciens américains Robert Caldwell et Paul Steinhardt, porte le joli nom de « quintessence ». L'idée s'inspire directement de l'inflation cosmique, cette phase d'expansion fulgurante qu'aurait connue à ses tout débuts l'Univers. Là aussi, un champ — dont la nature reste inconnue — aurait brièvement dominé la dynamique du cosmos. L'énergie noire pourrait ainsi être une version atténuée de ce phénomène : un champ évoluant lentement et continuant, de nos jours encore, à influencer l'expansion.

Mais cette hypothèse soulève immédiatement une difficulté. Si un tel champ existe, pourquoi ne l'a-t-on jamais détecté ? Et surtout, pourquoi serait-il encore en train d'évoluer précisément à cette époque de l'Univers où nous pouvons l'observer ? Drôle de coïncidence… *« En général, un champ scalaire se stabilise vers un minimum et cesse d'évoluer »,* indique Filippo Vernizzi. Autrement dit,

MÉTHODE

Comment Desi mesure l'expansion de l'Univers

L'Univers est en expansion depuis sa naissance, il y a 13,8 milliards d'années. Et ce rythme accélère depuis environ 5 milliards d'années sous l'effet de l'énergie noire. Pour mesurer cette expansion, les cosmologistes utilisent les oscillations acoustiques des baryons. Elles résultent d'ondes de pression ayant parcouru l'Univers primordial avant que la lumière puisse s'en échapper, 380 000 ans après le Big Bang. Ces ondes ont créé des régions plus denses en matière que d'autres. La distance séparant ces zones a grandi avec l'Univers. Aujourd'hui, cette empreinte subsiste dans la répartition des galaxies. En mesurant leur distance moyenne caractéristique (cercle jaune), les cosmologistes retrouvent la trace des oscillations baryoniques dont la taille a grandi avec l'expansion de l'Univers, comme les cercles concentriques créés par une pierre jetée dans l'eau.



il devrait se figer, comme le champ de Higgs une fois qu'il a donné leur masse aux particules.
Ce n'est pas tout. Si ce champ est suffisamment léger pour évoluer à l'échelle de l'Univers, il pourrait aussi se manifester sous la forme d'une nouvelle interaction — une « cinquième force » venant s'ajouter aux quatre autres (gravitation, électromagnétique, interaction forte et faible). Or, aucune expérience menée dans le Système solaire ou en laboratoire n'en a jamais révélé la moindre trace.
Mais, prouvant que l'énergie noire a décidément des ressources pour nous surprendre, les données de Desi suggèrent aussi que l'Univers aurait pu connaître une phase transitoire durant laquelle la densité d'énergie noire aurait augmenté à mesure qu'il s'étendait. L'énergie noire serait alors devenue, un temps, de plus en plus dominante à mesure que l'espace grandissait. Un comportement particulièrement déroutant, qualifié de « fantôme » par les physiciens.

CNRS PARIS-CENTRE

« Aucun signal ne plaide pour le moment en faveur d'une modification de la gravité »

Pauline Zarrouk, cosmologiste, responsable de la collaboration Desi au CNRS

Enfin, il existe une autre piste explorée par les scientifiques : remettre en cause la gravitation elle-même. Dans ce cas, l'accélération de l'expansion ne proviendrait pas d'une énergie noire mystérieuse, mais d'une modification des lois de la gravité lorsqu'elles s'exercent à de très grandes distances. Ces pistes sont activement explorées mais elles se heurtent à des contraintes sévères : la relativité générale a été vérifiée avec une précision extrême dans le Système solaire, et même au-delà grâce aux ondes gravitationnelles.

Trois ans de données restent encore à analyser

Surtout, les résultats actuels de Desi ne pointent pas dans cette direction. Une première analyse, fondée sur un an d'observations et publiée fin 2024, confirme la validité de la théorie d'Einstein à grande échelle. *« Aucun signal ne plaide pour le moment en faveur d'une modification de la gravité »,* constate Pauline Zarrouk. Cependant, les équipes travaillent déjà à affiner ce résultat avec trois ans de données supplémentaires…
Même si l'énergie noire est encore loin d'avoir livré ses secrets, un effort sans précédent est désormais engagé pour comprendre sa nature. La mission Desi a été prolongée au moins jusqu'en 2028, tandis que de nouveaux instruments prennent le relais. Le satellite européen Euclid cartographie déjà l'Univers depuis l'espace, et l'observatoire américain-Vera-Rubin livrera bientôt ses premières données. Avec ces outils, les chercheurs accèdent pour la première fois à l'histoire récente de l'expansion, là où l'énergie noire domine. De quoi espérer en percer le mystère et, peut-être, révéler une physique encore insoupçonnée. ■

INSTRUMENT

Desi, l'« usine à spectres »

C'est l'un des outils les plus ambitieux jamais consacrés à l'étude de l'Univers. Installé sur le télescope Mayall, à Kitt Peak (États-Unis), Desi a un cœur composé de 5000 fibres optiques robotisées, qui viennent se positionner avec une précision extrême sur autant de galaxies simultanément. Chacune capte leur lumière et l'achemine vers des spectrographes capables de la décomposer en ses différentes longueurs d'onde. En analysant ces spectres, les astronomes mesurent la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent — et donc leur position dans l'espace et le temps. Cette capacité de production massive vaut à Desi son surnom d'« usine à spectres ». Chaque nuit, l'instrument collecte des données sur des centaines de milliers d'objets célestes. Prolongée jusqu'à fin 2028, la mission va désormais étendre son relevé vers le sud du ciel, afin de multiplier les recoupements avec l'observatoire Vera-Rubin… et atteindre les 60 millions de galaxies recensées. Une seconde phase, Desi 2, pourrait ensuite prendre le relais à partir de 2029, pour six années supplémentaires.
Le programme viserait des galaxies plus lointaines, donc un Univers plus ancien, pour tester l'hypothèse d'une variation des propriétés de l'énergie noire dans l'histoire cosmique.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

L'intérieur du télescope Nicholas-Mayall à l'observatoire national de Kitt Peak, sur lequel Desi est monté.

NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN

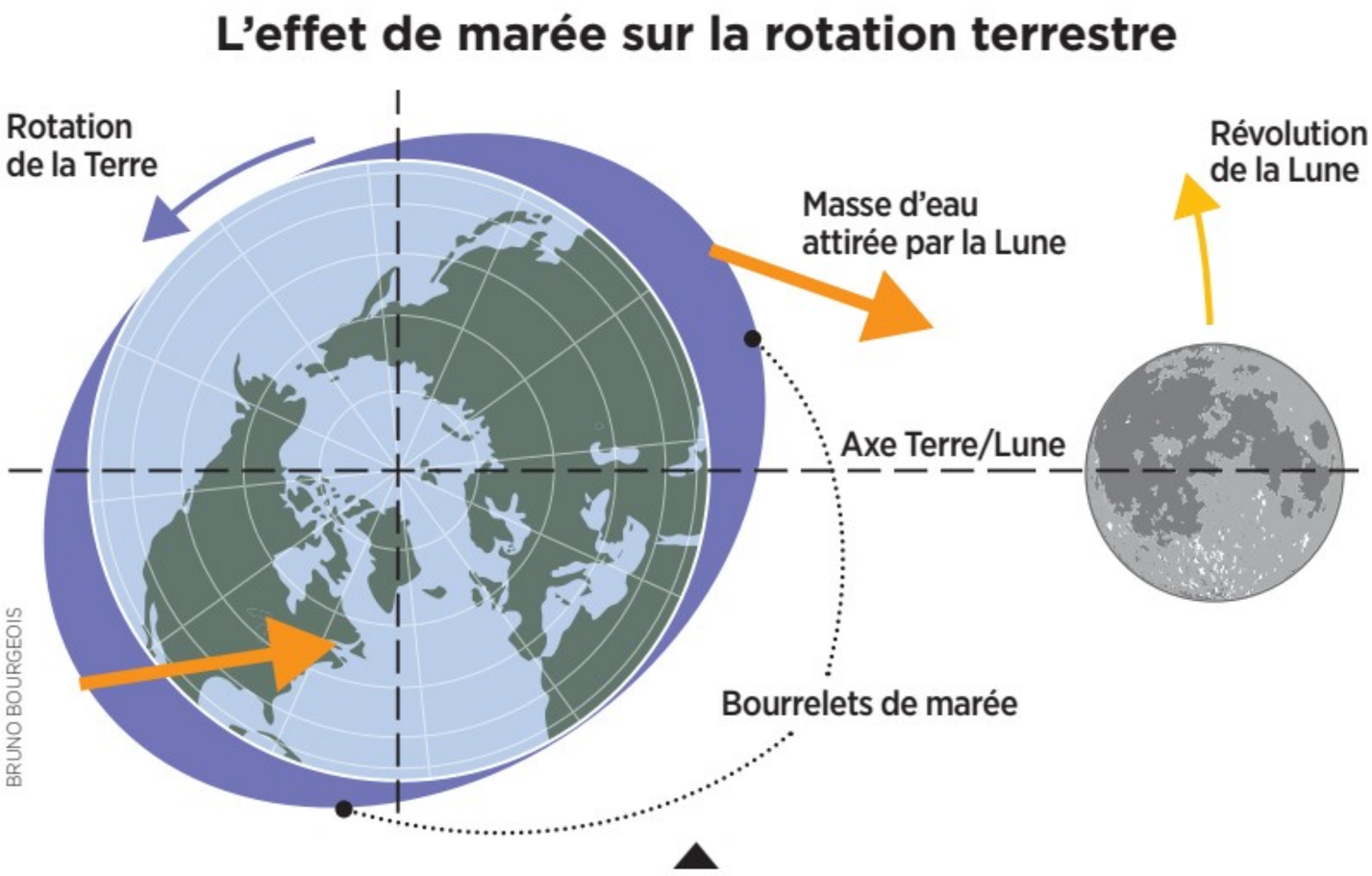
Pour mesurer la rotation terrestre, des radiotélescopes unis en réseaux, comme ici l'Observatoire VLBI de Mizusawa (Japon), recueillent des données permettant de déterminer l'orientation de la Terre dans l'espace et ses moindres variations.

Pourquoi la Terre tourne de plus en plus vite

Un phénomène estival inattendu intrigue les scientifiques : depuis quelques années, notre planète accélère légèrement sa rotation. Imperceptible, ce gain de vitesse pourrait, à terme, bouleverser notre façon de mesurer le temps.

Attachez vos ceintures ! La rotation de la Terre sur elle-même est de plus en plus rapide et les scientifiques ne savent pas comment l'expliquer. L'accélération est, certes, infime mais bel et bien mesurable, et se confirme d'année en année. *« Les pics de vitesse se produisent toujours en été »,* explique Christian Bizouard, directeur du service international de la rotation de la Terre et chercheur à l'Observatoire de Paris. Le 9 juillet 2025, notre planète avait ainsi bouclé avec une avance de 1,38 milliseconde un tour complet autour de son axe ; tour qui, par convention, dure exactement 24 heures soit 86 400 secondes. Et le 12 juillet 2024, cet écart atteignait 1,62 milliseconde, un record. Tant et si bien que depuis 2022, la durée moyenne du jour astronomique, dictée par la rotation de la Terre, est plus courte d'environ 0,5 milliseconde par rapport à celle du Temps atomique international : l'échelle extrêmement stable et précise fondée sur les vibrations ultra-régulières des atomes, que les scientifiques utilisent comme chronomètre absolu. Depuis que les horloges atomiques ont été mises en place, dans les années 1950, c'est la première fois que de telles avances sont enregistrées ! Le phénomène se manifestera-t-il à nouveau cet été ? Va-t-il s'accentuer ou, au contraire, disparaître ? *« Nous sommes dans le brouillard car son origine demeure incertaine »,* reconnaît l'astronome.

Comme les autres planètes, lunes ou astéroïdes du Système solaire, la Terre est animée d'un mouvement de rotation propre, qui a débuté dès la formation du disque protoplanétaire il y a 4,6 milliards d'années. En raison



L'attraction gravitationnelle de la Lune déforme nos océans en créant deux bourrelets décalés par rapport à l'axe Terre-Lune. Ces renflements engendrent en retour un couple de forces qui ralentit la rotation de la Terre au rythme de deux millisecondes par siècle.

d'une loi fondamentale de la physique, appelée « conservation du moment angulaire » (ce dernier mesure l'état de rotation d'un corps autour d'un point ou d'un axe), il serait resté inchangé si aucune force ne s'exerçait sur le globe terrestre. Mais celui-ci n'est pas un objet isolé ni homogène. Il est soumis tout particulièrement à l'influence de la Lune, *« le corps qui imprime sa marque la plus forte sur la rotation de la Terre »,* pose Joël Sommeria, directeur de recherche au Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels à l'université Grenoble Alpes.

Maintenir la cohérence entre jours atomique et astronomique

Notre satellite naturel agit comme un frein subtil mais constant, à cause d'un phénomène appelé « effet de marée ». Son attraction gravitationnelle déforme en effet notre planète : les océans — et même, dans une moindre mesure, la croûte terrestre — se soulèvent en deux bourrelets, l'un face à la Lune, l'autre du côté opposé *(voir le schéma ci-dessus).* Or, la Terre pivote sur elle-même bien plus vite que l'astre sélène n'en fait le tour (environ 27 jours). Les bourrelets sont ainsi entraînés vers l'avant, légèrement décalés par rapport à l'axe Terre-Lune. C'est là que le mécanisme clé intervient, car la Lune « tire » sur ces masses d'eau déplacées. Résultat : un couple de forces qui agit dans le sens opposé de la rotation de la Terre et la ralentit d'environ 2 millisecondes par siècle. L'énergie cédée par la Terre n'est cependant pas perdue : elle est transférée en partie à la Lune, qui s'éloigne au rythme de 3,8 cm par an — *« une valeur établie en mesurant le temps aller-retour d'impulsions laser tirées vers des réflecteurs posés, dès 1969, par les astronautes des missions Apollo »,* indique Joël Sommeria.

À l'échelle des temps géologiques, les journées terrestres se sont donc peu à peu allongées. Elles ne duraient ainsi que 18 heures il y a 1,4 milliard d'années ! Et si l'on remonte le temps 400 millions d'années en arrière, la Terre accomplissait 410 rotations par an (au lieu de 365 aujourd'hui), ce qui se traduisait par des journées de 21,5 heures comme l'attestent les coraux fossiles, dont les stries de croissance quotidiennes révèlent le nombre de jours dans une année. Vers la fin de l'ère des dinosaures, il y a 70 millions d'années, une journée durait en revanche 23,5 heures. *« Et devrait s'étirer jusqu'à 25 heures si l'on se projette dans 200 millions d'années »*, calcule Joël Sommeria. Pour compenser ce lent mais inexorable décalage entre la durée du jour astronomique, soumis à des fluctuations, et celle du temps atomique, parfaitement stable, plusieurs institutions — dont le Bureau international des poids et mesures basé à Sèvres (Hauts-de-Seine) — ont établi en 1972 un nouveau standard : le Temps universel coordonné (UTC). Il sert depuis à synchroniser l'ensemble des activités humaines et technologiques, des réseaux électriques aux télécommunications, en passant par les transactions bancaires. Objectif : maintenir la cohérence entre la durée du jour astronomique et atomique (pour les cycles jour/nuit par exemple) en ajoutant une seconde dite « intercalaire » au Temps atomique international dès que l'écart approche 0,9 seconde. La première a été introduite le 31 décembre 1972, à 23 h 59 min 59 s, une opération renouvelée les années suivantes. *« Au départ, les astronomes pensaient qu'il faudrait en insérer presque chaque année »,* rappelle Christian Bizouard.

L'influence du noyau terrestre est l'hypothèse privilégiée

Mais ils n'en ajouteront que 27 depuis la création du temps UTC, la dernière remontant à 2016. Car la vitesse de rotation de la Terre, mesurée avec une précision extrême par différentes techniques *(lire l'encadré ci-contre),* s'est mise à accélérer ces dernières décennies. De manière d'abord discrète et irrégulière, puis plus marquée depuis 2020… Au point de rattraper, et désormais dépasser, la durée du jour atomique ! *« Personne n'avait anticipé cela »,* admet Christian Bizouard. Si les effets de marée jouent un rôle déterminant, d'autres mécanismes peuvent influencer la rotation du globe sur des échelles de temps plus réduites. En déplaçant des masses d'air à des vitesses variables, les courants atmosphériques peuvent, par exemple, freiner

ou accélérer légèrement cette rotation. C'est pour cette raison que les pics de vitesse surviennent toujours en été : dans l'hémisphère nord, où se concentrent 70 % des terres émergées, les vents sont en effet moins rapides qu'en hiver, ce qui conduit la Terre à tourner un peu plus vite afin de conserver son moment angulaire. Le changement climatique pourrait-il, en modifiant la circulation des vents de façon durable, provoquer des variations non plus seulement saisonnières mais aussi sur des décennies ? *« L'effet existe mais il reste très faible : des dizaines de fois inférieur à ce qui est observé »,* tempère l'astronome. Même constat du côté de la fonte des calottes glaciaires. En redistribuant les masses d'eau des pôles vers les océans, en particulier les régions équatoriales, ce phénomène agit, certes, lui aussi sur la rotation de la Terre ; mais l'impact est là encore minime, indiquent les modèles. Et il entraîne même une légère décélération. *« Sans l'influence du changement climatique, l'accélération actuelle serait encore plus prononcée »,* conclut-il.

JOËL SOMMERIA

« Une journée devrait s'étirer jusqu'à 25 heures si l'on se projette dans 200 millions d'années »

Joël Sommeria, directeur de recherche au Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels à l'université Grenoble Alpes

L'explication se cacherait en réalité sous nos pieds, à plus de 3000 km de profondeur. Le noyau terrestre, dont le diamètre dépasse de deux fois celui de la Lune, renferme en effet une partie liquide dont la dynamique pourrait être à l'origine de ce mystérieux phénomène. *« Les métaux en fusion du noyau liquide sont soumis à de puissants mouvements de convection, un peu comme dans une casserole d'eau chauffée »,* détaille Joël Sommeria. Ces mouvements restent lents mais déplacent des masses gigantesques. En se réorganisant, de tels courants pourraient échanger ainsi du moment angulaire avec le manteau et la croûte terrestres… et expliquer cette phase d'accélération ! *« C'est aujourd'hui l'hypothèse privilégiée mais elle reste très difficile à prouver »,* poursuit le géophysicien.

Secondes négatives et bug informatique

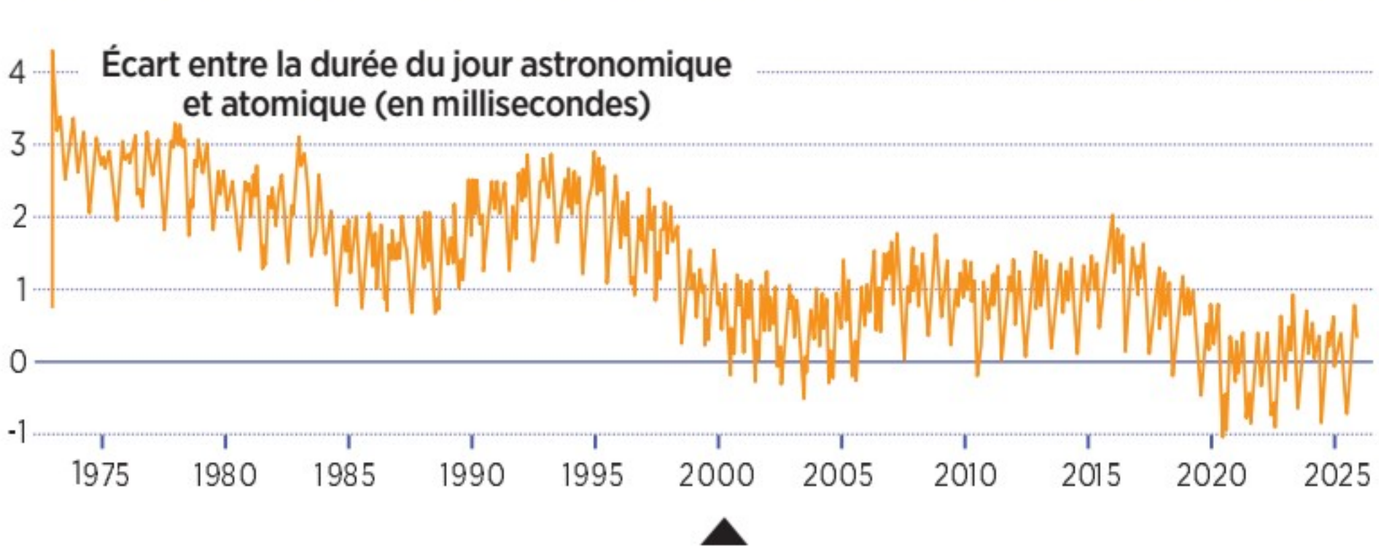
Car l'océan de fer qui bouillonne dans les entrailles de notre planète demeure inaccessible : ses composition, viscosité ou conductivité électrique sont mal caractérisées. Les chercheurs ne peuvent l'explorer qu'indirectement, à travers l'étude du champ de gravité de la Terre, de son champ magnétique, de la propagation d'ondes sismiques… et de sa vitesse de rotation ! *« Or, les modélisations échouent pour le moment à reproduire les accélérations mesurées »,* constate-t-il. Même si les scientifiques estiment que ces courants profonds obéissent à des cycles et que l'accélération actuelle ne sera que passagère, ils sont donc incapables de prévoir son évolution ! *« Si le processus se maintient au rythme actuel, il ne faudra plus ajouter des secondes au Temps atomique international mais en retrancher »,* avertit Christian Bizouard. Une situation qui pourrait survenir *« entre 2030 et 2035 »*. Car ce scénario serait loin d'être anodin : les systèmes informatiques, dont les horloges n'ont pas été conçues pour gérer des secondes « négatives », pourraient être déstabilisés et connaître alors de nombreux dysfonctionnements. ■

Franck Daninos

RADIOASTRONOMIE

Mesurer la durée du jour

Les scientifiques combinent plusieurs techniques indépendantes pour mesurer la vitesse de rotation de la Terre, et donc la durée du jour. La méthode de référence repose sur l'interférométrie à très longue base. Des réseaux de radiotélescopes, sur toute la planète, observent pour cela des quasars, sources radio extrêmement stables situées à des milliards d'années-lumière. En comparant le temps d'arrivée de leurs signaux sur chacune des antennes, les chercheurs déterminent l'orientation de la Terre dans l'espace et ses moindres variations de rotation. D'autres techniques s'appuient sur des objets artificiels, tels les satellites de la constellation GPS qui suivent en continu la position de milliers de stations au sol, et reconstituent ainsi la vitesse de rotation de la Terre.



BRUNO BOURGEOIS

Les variations de la durée du jour, calculées par le Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence, montrent que les journées sont moins longues depuis les années 1970, à mesure que la rotation de la Terre s'accélère.

Que valent les comparateurs d'IA ?

Les tests d'évaluation sont de plus en plus utilisés pour mesurer l'intelligence des grands modèles de langage (LLM) et comparer leurs performances, mais ils souffrent de nombreux biais : surapprentissage, contamination des données d'entraînement, etc. Pour y remédier, des chercheurs proposent de repenser entièrement leur conception.

« *C'est comme si vous parliez à un expert de niveau doctorat.* » Au lancement de GPT-5 en août 2025, le P-DG d'OpenAI Sam Altman sort l'artillerie lourde pour vanter les capacités de la nouvelle mouture du chatbot. La firme l'assure, il s'agit d'une nouvelle étape majeure. Elle en veut pour preuve les scores obtenus par le grand modèle de langage sur différents tests de performance.

L'IA de Google aussi a passé sa thèse l'année dernière. Lors de la présentation de Gemini 3, en novembre 2025, le public pouvait lire dans un communiqué que le modèle « *fait preuve d'un raisonnement de niveau doctorat* ». Et, là encore, les prouesses de l'IA dans diverses épreuves servent d'arguments pour appuyer cette déclaration. Ces tests, plus communément appelés « benchmarks », mesurent les capacités d'un LLM dans un domaine ou une tâche spécifique comme la résolution de problèmes logiques, l'extraction d'information ou l'ingénierie logicielle. Aussi variées soient-elles, ces évaluations expriment, pour la plupart, un résultat sous la forme d'un score, idéal pour dresser le classement des meilleures IA. Les entreprises développant des modèles de langage ont ainsi la possibilité de démontrer la supériorité de leur système sur la concurrence auprès du public et des investisseurs.

Le score devient un objectif en soi

Sur son blog, le chercheur Sebastian Raschka définit le mot de l'année 2025, qu'il a choisi pour qualifier la trajectoire prise par le développement des LLM : le « benchmaxxing ». C'est-à-dire « *un fort accent sur l'amélioration des chiffres du classement, parfois au point où le score devient un objectif en soi* ». En faisant d'un nombre la finalité, les laboratoires d'IA « *ne se soucient pas des mécanismes sous-jacents à son origine* », analyse Melanie Mitchell, chercheuse à l'Institut de Santa Fe (États-Unis). Et ces rouages dissimulent bien des biais.

Certains paramètres de l'IA lors de l'exécution d'un benchmark, par exemple, peuvent affecter les résultats de manière considérable selon Zerui Cheng, doctorant à l'université de Princeton (États-Unis) et chercheur en intelligence artificielle. « *La formulation du prompt, le degré de "créativité" autorisé au modèle, ses instructions système ou la conception du code qui extrait sa réponse* », énumère-t-il. Mais, pour lui, l'IA peut être optimisée pour mieux réussir ces tests. Plus précisément, la littérature scientifique évoque souvent le « surapprentissage », soit lorsqu'un LLM donne une réponse juste grâce à ses données d'entraînement, mais que ces données ne lui permettent pas d'appliquer ses connaissances à un problème aux paramètres différents. « *Si un modèle est entraîné à partir de photos de chiens à poil blanc, il pourrait en déduire que le "poil blanc" définit ce qu'est un chien. Si on lui présente ensuite une photo, absente des données d'entraînement, d'un chien à poil noir, il dira que ce n'est pas un chien* », illustre Melanie Mitchell.

Dans les cas plus graves, le modèle mémorise la formulation exacte des questions posées par un benchmark et de leur réponse respective. « *Si vous posez une question qui sort du cadre mais qui vise à évaluer la même compétence, le système ne sera pas en mesure d'y répondre, car il ne l'a pas mémorisée* », explique la chercheuse. Ce problème est en lien direct avec un autre phénomène documenté, la contamination. En février 2026, OpenAI annonçait cesser d'utiliser SWE-

GETTY IMAGES

Les modèles d'IA sont en compétition pour obtenir les meilleurs résultats aux tests, qui serviront à les valoriser.

bench Verified, un test qui jauge les capacités d'un LLM à analyser et modifier du code informatique. L'entreprise observe que GPT5.2 a incorporé les solutions aux exercices soumis par SWE-bench Verified dans son corpus d'entraînement, celles-ci étant en accès libre. L'évaluation perd alors tout intérêt, mais encore faut-il se rendre compte de cette « contamination » pour le savoir ! Or, c'est un problème *« largement répandu »* parmi les benchmarks, selon Zerui Cheng, et c'est une des raisons pour lesquelles *« les tests qui prétendent mesurer le "raisonnement" ou l'"intelligence générale" mesurent en réalité la mémorisation de données »*. Dans une étude « préprint » (non relue par les pairs) de septembre 2025, à laquelle il a grandement contribué, le chercheur présente une plateforme collaborative, PeerBench, afin de remédier à ces problèmes avec des épreuves conçues et renouvelées régulièrement par ses utilisateurs.

Pour se prémunir des nombreux autres biais, il faut, en revanche, revoir la conception et l'approche même derrière les benchmarks. Melanie Mitchell s'attardait sur le sujet dans une présentation donnée à la conférence internationale NeurIPS 2025. Elle y mentionnait notamment un préprint d'octobre dernier sur le test ARC-AGI 1 *(voir l'encadré p. 34),* lequel mesure la capacité d'un LLM à mobiliser des concepts abstraits comme la position d'un objet dans l'espace ou la symétrie. L'épreuve consiste à soumettre une grille remplie de carrés colorés à l'IA, pour qu'elle la transforme selon une règle qu'elle peut déduire à partir d'exemples d'autres grilles. Après la résolution de plusieurs puzzles, le système se voit attribuer un pourcentage de réussite en fonction du nombre de bonnes réponses.

La capacité de l'IA à raisonner est surestimée

Melanie Mitchell et son groupe de recherche ont soumis à plusieurs modèles une version simplifiée de ce benchmark avec une exigence supplémentaire : formuler la règle sous-jacente qui permet de résoudre le puzzle. Or, lorsque l'IA fournit une grille correcte, elle échoue à cet exercice dans 30 % des cas. Soit parce qu'elle énonce une règle fausse, soit parce qu'elle décrit la logique à suivre sans faire référence aux concepts abstraits que le benchmark doit mesurer. L'étude conclut ainsi que l'épreuve et son score de précision surestiment la capacité de l'IA à raisonner. Mais cela peut aussi conduire à une sous-estimation, car ce seul indicateur occulte des contraintes externes qui peuvent atténuer les performances des LLM. Il se trouve que pour ARC-AGI, les modèles s'en sortent bien mieux s'ils traitent le puzzle non pas sous la forme

ZERUI CHENG

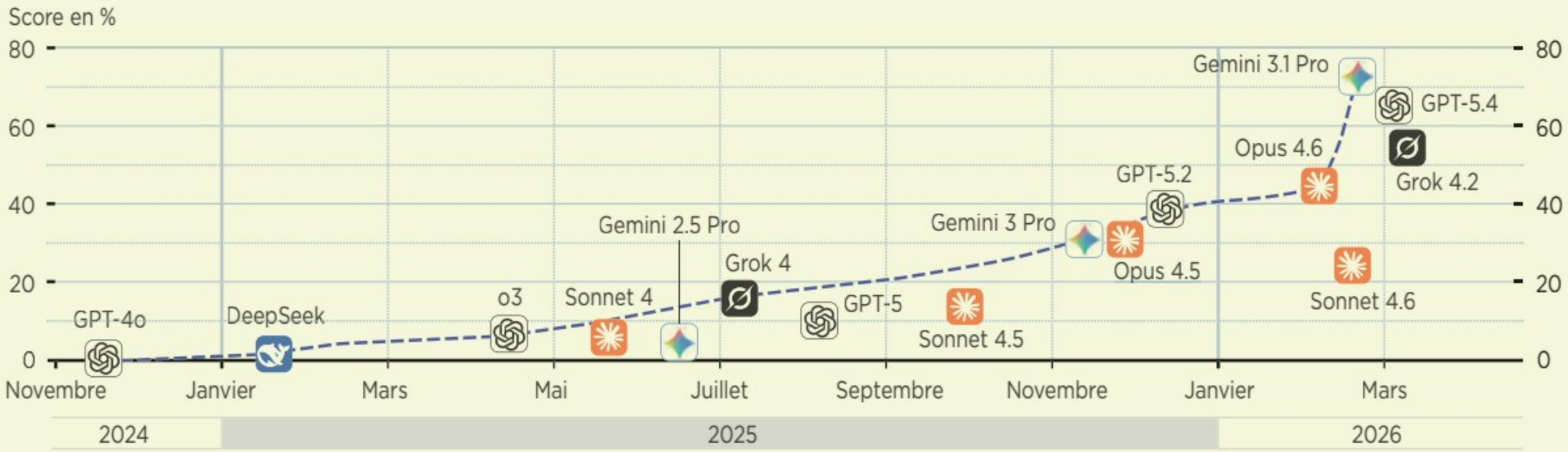
« Les tests qui prétendent mesurer le raisonnement ou l'intelligence générale mesurent en réalité la mémorisation de données »

Zerui Cheng, doctorant et chercheur en intelligence artificielle à l'université de Princeton (États-Unis)

RAISONNEMENT

Une épreuve encore difficile pour l'IA

Considéré comme l'un des benchmarks les plus retors pour mesurer les progrès des grands modèles de langage, ARC-AGI franchit un cap avec sa troisième version, dévoilée le 27 mars. Ce test, conçu par le chercheur français François Chollet, soumet des énigmes visuelles uniques à l'IA pour évaluer ses capacités de raisonnement logique. Cette nouvelle mouture d'ARC-AGI va plus loin. Les puzzles statiques laissent place à des mini-jeux interactifs sur une grille de pixels colorés. Étape par étape, l'IA doit explorer, manipuler des éléments, anticiper les effets d'une action et, plus largement, s'adapter à une situation nouvelle sans instructions ni connaissances préalables. Bien des modèles se sont heurtés à ARC-AGI 2 après son lancement en mars 2025. GPT-5, par exemple, atteignait au mieux 10 % de bonnes réponses à sa sortie. La difficulté monte encore d'un cran avec ARC-AGI 3. Les premières tentatives de Google, d'OpenAI et d'Anthropic plafonnent à moins de 1 % de réussite, malgré une importante puissance de calcul. Un paramètre que le benchmark prend en compte afin de mesurer le rapport entre la performance d'un modèle et le coût de celle-ci. Ainsi, Anthropic a dépensé près de 9000 dollars pour un score de 0,5 % sur ARC-AGI 3.



Les tests ARC-AGI mesurent la capacité des modèles de langage à mobiliser des concepts abstraits. Dans la version 2 (ci-dessus) lancée en mars 2025, on voit que leurs résultats, très mauvais au départ, progressent de façon fulgurante en quelques mois.

BRUNO BOURGEOIS / SOURCE : CENTER FOR AI SAFETY

d'une image, mais d'un tableau avec des chiffres, correspondant chacun à une couleur. La chercheuse note que, si ces systèmes échouent souvent à générer la bonne grille quand on leur impose l'analyse visuelle, ils parviennent parfois à formuler correctement la règle sous-jacente. Soit une preuve de raisonnement qu'ARC-AGI 1 ne mesure pas, puisqu'il se concentre sur la performance seule. Ce biais, comme la contamination, affecte la justesse avec laquelle ces tests mesurent le phénomène général qu'ils prétendent évaluer. Un préprint de novembre 2025 considère que sur 445 benchmarks passés au crible, 53 % sont discutables de ce point de vue. Ce travail, réalisé par 42 chercheurs de plusieurs universités, notamment celle d'Oxford, constate des problèmes cruciaux. Seuls 16 % prévoient des méthodes statistiques pour comparer les performances mesurées. *« Cela signifie que les différences observées entre les systèmes pourraient être dues au hasard plutôt qu'à une réelle amélioration »,* selon l'Oxford Internet Institute, qui présente l'étude.

Pour Melanie Mitchell, l'évaluation de l'intelligence des LLM ferait bien d'adopter des réflexes communs dans la recherche consacrée à d'autres disciplines, comme la psychologie. *« Il faut imaginer quelles stratégies l'IA pourrait employer pour résoudre les tâches du benchmark sans disposer de la capacité qu'il mesure, c'est-à-dire créer des expériences de contrôle pour remettre en question son hypothèse. Car c'est ça, la science »,* assène la chercheuse. *« En psychologie, la conception de ce genre d'études contrôlées requiert une grande créativité. Je ne pense pas que ce soit suffisamment le cas dans le domaine de l'IA. Les gens se contentent d'accepter les scores comme preuves de capacités générales »,* ajoute-t-elle. Difficile toutefois de motiver les principaux acteurs du secteur, engagés dans une intense compétition, à remettre en question publiquement les performances de leurs modèles. ■

Théo Brajard

Réservé aux abonnés

SCIENCES ET AVENIR

Profitez des avantages numériques compris dans votre abonnement !

Chère abonnée, cher abonné,

Chaque semaine, la Rédaction de Sciences et Avenir crée et met en ligne sur www.sciencesetavenir.fr 15 articles exclusifs réservés aux abonnés que vous ne trouverez pas dans le magazine. Pour y accéder et profiter pleinement de tous vos services numériques, **vous devez activer votre compte abonné.**

Vous aurez ainsi également accès sur le site www.sciencesetavenir.fr à :

- **La bibliothèque numérique** avec les magazines compris dans votre abonnement,
- **Une douzaine de vidéos** (reportages, entretiens, démonstrations par les labos de recherche…) par mois,
- **La lecture audio** des articles du site,
- L'accès aux magazines sur votre smartphone ou tablette via **l'application « Sciences et avenir le magazine »**,
- L'accès au contenu du site sciencesetavenir.fr avec l'application « **Sciences et avenir** »,
- Une navigation zen allégée en publicité.

Comment accéder à tous ces services ? En créant votre compte sur www.sciencesetavenir.fr :

1. Notez votre numéro d'abonné indiqué sur le « film » d'emballage de votre magazine (ex SCA **0/123456**). Si vous ne l'avez pas, contactez le service client au **01 55 56 71 48** ou envoyez un mail à abonnements@sciencesetavenir.com
2. Rendez-vous sur www.sciencesetavenir.fr et cliquez sur « Se connecter »
3. Cliquez sur « créer un compte » et remplissez le formulaire avec les informations demandées.

Pour télécharger les applications Sciences et Avenir et Sciences et Avenir Le magazine

Si vous avez un smartphone ou une tablette Apple, rendez-vous sur l'App Store de votre appareil
Pour les autres smartphones et tablettes, rendez-vous sur le Google Play de votre appareil

Alors n'hésitez plus, rendez-vous dès à présent sur www.sciencesetavenir.fr

SCAACTIVATION25

Camouflage
La botte secrète des animaux

Maîtresses de l'illusion, ces différentes espèces déploient des stratégies étonnantes pour tromper, attirer des proies ou dissuader leurs prédateurs. Voici un florilège en images des découvertes récentes les plus fascinantes.

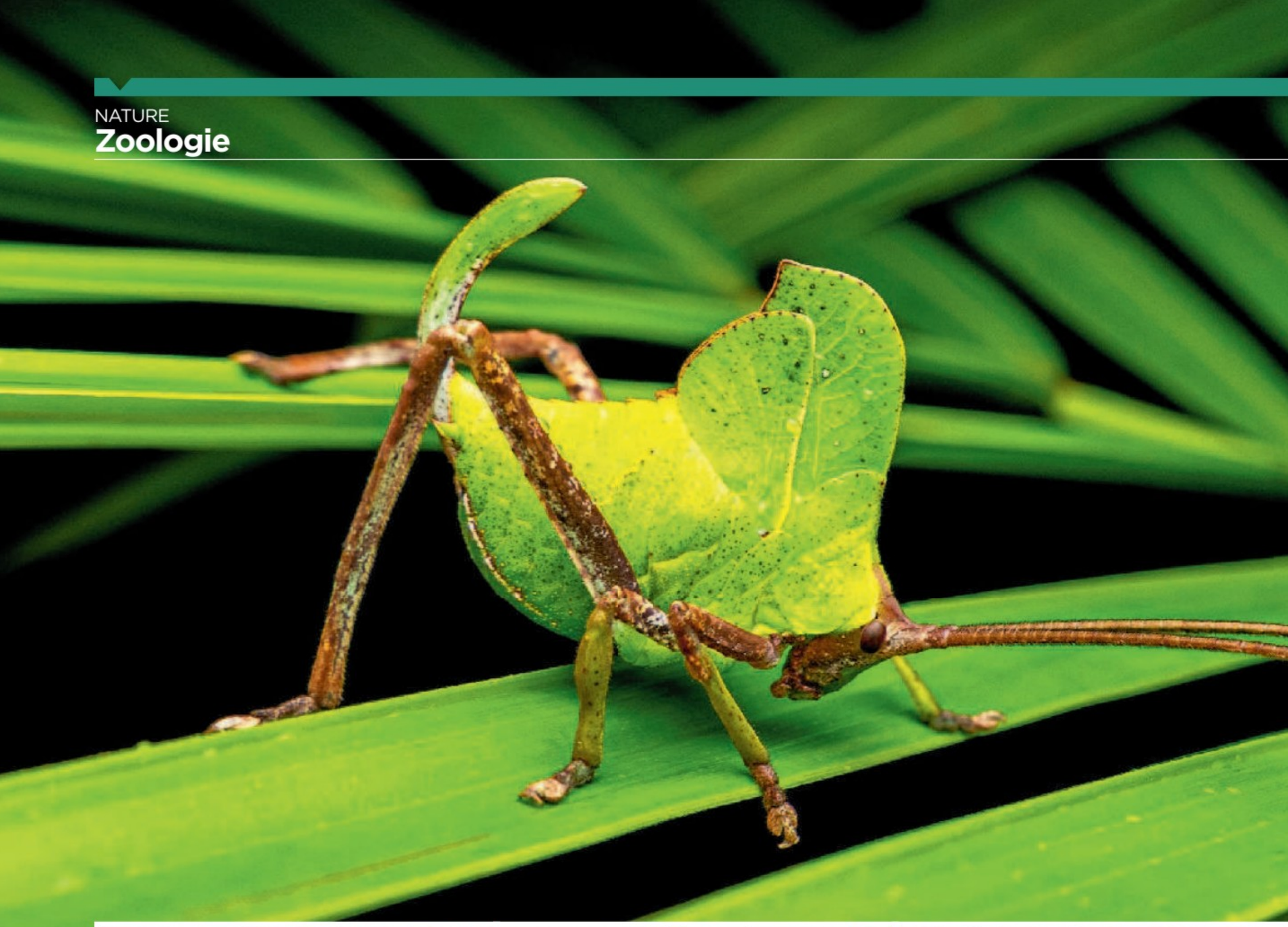
Par Hervé Ratel

Pour vivre heureux, vivons grimés. De nombreuses espèces animales ont adopté des stratégies étonnantes pour survivre. Certaines se fondent dans l'environnement en prenant l'apparence d'un élément de leur milieu. D'autres, au contraire, se font parfaitement visibles mais, en ressemblant à un animal toxique et dangereux, découragent les prédateurs. Et la science n'en finit pas de découvrir des astuces de déguisement toujours plus étonnantes.

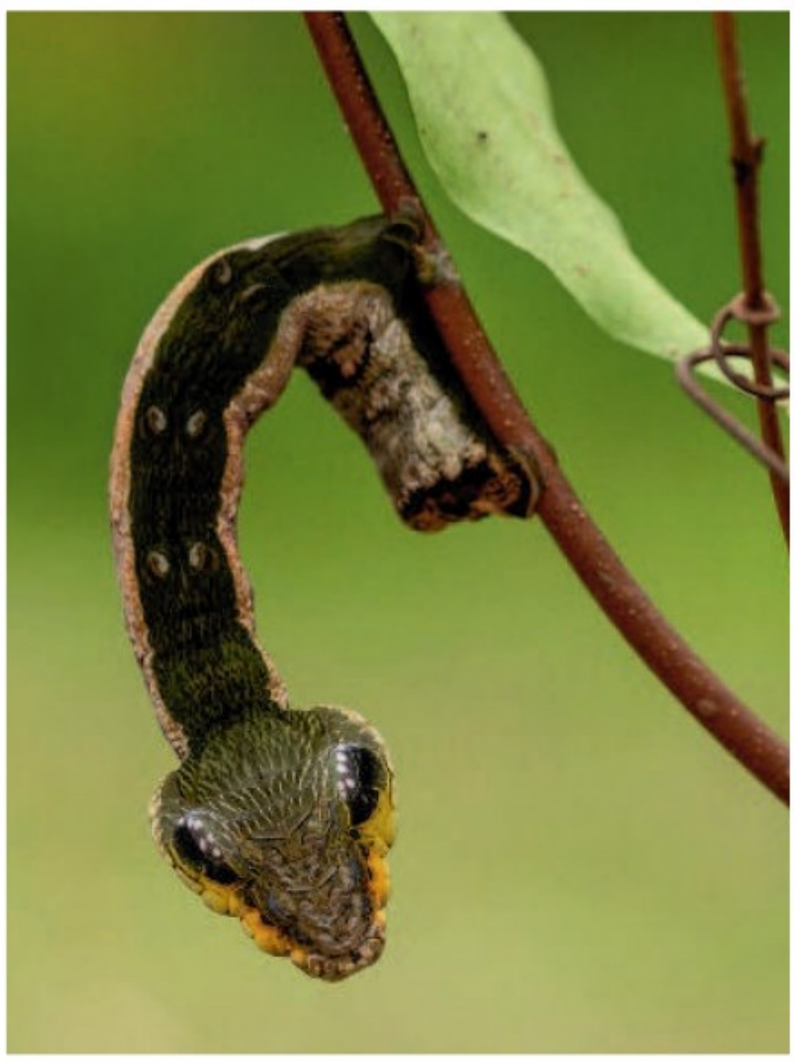
Ainsi, tout récemment, cette chenille qui se pare de morceaux de cadavres afin de passer inaperçue sur la toile d'araignée qu'elle squatte. Des stratégies adaptatives visuelles mais aussi, parfois, olfactives ou qui se doublent d'un mimétisme cinétique : en plus de prendre l'apparence d'un végétal, certains insectes se balancent comme celui-ci le ferait sous l'action du vent. Des stratagèmes pour tromper seul ou bien à plusieurs. Les rayures des zèbres joueraient ainsi le rôle d'un maquillage disruptif, modifiant la silhouette des animaux et perturbant visuellement les lions qui souhaiteraient les mettre à leur menu. Charles Darwin était fasciné par le camouflage animal, dans lequel il percevait une démonstration éclatante de la sélection naturelle. Les organismes qui développent des stratégies mimétiques deviennent parmi les plus aptes à survivre et donc à transmettre leurs gènes ainsi que leur science du déguisement. ■

Le poisson-pierre (« Synanceia verrucosa »), l'un des plus venimeux au monde, est l'exemple parfait du mimétisme cryptique consistant, pour un animal, à prendre l'apparence de son environnement.

GEORGETTE DOUWMA /NATUREPL.FR/EB PHOTO



Cette seiche du genre « Sepia », que l'on trouve sur l'île de Komodo, en Indonésie, peut imiter un crinoïde, animal marin ayant l'apparence d'une plante.



La chenille « Hemeroplanes triptolemus » est capable, en gonflant l'avant de son corps, de prendre l'aspect d'un serpent et de simuler une posture d'attaque quand elle se sent en danger.

L'écureuil américain « Callospermophilus lateralis » offre un bel exemple de camouflage olfactif : il mâchonne des mues de serpent et se badigeonne de l'odeur pour passer inaperçu de son prédateur.

Cette sauterelle de la famille des « Tettigoniidae » (« Pterochroza ocellata »), aux antennes plus longues que le corps, adopte les traits d'une feuille.

VINCENT PREMEL / BIOSPHOTO

La chenille du papillon piqueur de fruits (« Eudocima phalonia ») se pare de faux yeux pour dissuader les prédateurs de s'approcher d'elle. Un type de mimétisme adopté par beaucoup d'autres espèces.

Cette chenille du genre « Hyposmocoma » vit sur une toile d'araignée. Pour passer inaperçue de la maîtresse des lieux et pouvoir lui voler des proies, elle se recouvre de morceaux de cadavres.

N. WU / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO - M. BOWLER/ NATURE.PL/ EBPHOTO - CINDY MCINTYRE - MELVYN YEO / BIOSPHOTO - RUBINOFF LAB, UNIVERSITY OF HAWAII

La mante orchidée d'Asie du Sud-Est (« Hymenopus coronatus ») arbore l'apparence d'une fleur pour échapper à ses prédateurs, mais aussi pour attirer ses proies, des insectes pollinisateurs. Même ses pattes ont l'allure de pétales.

ALEX HYDE/ NATUREL / EBPHOTO

QUENTIN MARTINEZ / BIOSPHOTO - S. DALTON / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO - LISA MARIA SCHULTE ET AL.

L'uroplate satanique (« Uroplatus phantasticus ») est un gecko endémique de Madagascar vivant dans la forêt et à l'apparence de feuille, nervures comprises. Sa queue ressemble, elle aussi, à une feuille traversée de cannelures.

Le papillon indonésien « Kallima paralekta » prend également l'aspect d'une feuille. Pour tromper encore mieux son monde, l'insecte dodeline, comme s'il était bercé par le vent.

« Ranitomeya imitator » et « Ranitomeya variabilis » forment un exemple de mimétisme müllérien. En s'imitant mutuellement, ces grenouilles toxiques maximisent leurs chances de dissuader les prédateurs.

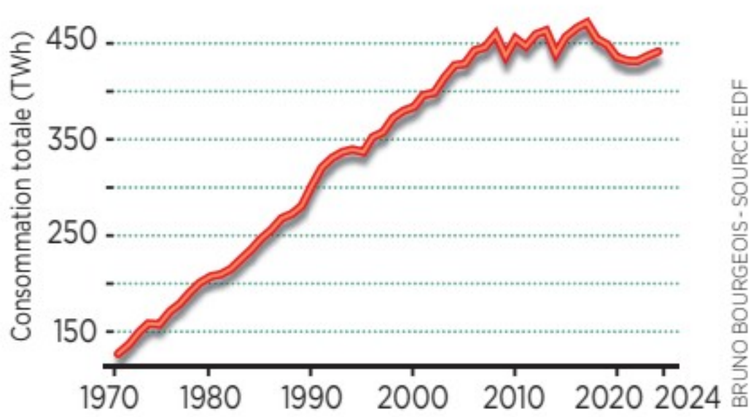
La délicate électrification de la France

Le passage du pétrole à l'électricité va bouleverser en profondeur la production et la consommation. Si l'urgence climatique est toujours mise en avant, les impératifs d'indépendance énergétique face aux guerres et aux tensions géopolitiques accélèrent ce plan d'électrification des usages.

En douceur sur le frein, prudente sur l'accélérateur. Ainsi pourrait se résumer l'actuelle politique énergétique française. L'Hexagone expérimente la réalité de ce qu'est une « transition » : le passage complexe du pétrole à l'électricité, qui bouleverse en profondeur consommation et production. Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), plan d'électrification, bilans prévisionnels du réseau de transport d'électricité (RTE) : les évènements de ces premiers mois en 2026 illustrent bien l'ampleur des changements en cours et les incertitudes qui pèseront sur eux.

Pourquoi tout transformer ? En premier lieu, à cause du changement climatique. La combustion des énergies fossiles a fait grimper la température globale de la Terre de 1,5 °C depuis 1750, mais cette urgence est totalement absente des derniers soubresauts de l'actualité française et mondiale. En février 2022, la guerre menée en Ukraine par la Russie a obligé les États européens à cesser d'acheter pétrole et gaz à leur grand voisin de l'Est. Les importations françaises d'énergie sont passées de 50 à 70 milliards d'euros par an, en moyenne, à 120 milliards cette année-là. Le gouvernement d'Élisabeth Borne a alors promu un grand plan de sobriété. En février 2026, la guerre entre Israël, les États-Unis et l'Iran a bloqué le détroit d'Ormuz dans le golfe Persique, mettant à l'arrêt 20 % du trafic maritime mondial de gaz et de pétrole. Le 30 mars, l'ONG américaine 350.org a calculé que cette crise avait coûté, en moins d'un mois, 95 milliards d'euros à l'ensemble des consommateurs dans le monde. Cette fois-ci, la réponse du gouvernement de Sébastien Lecornu est d'accélérer l'électrification des usages. Mais pas au nom du climat. *« L'énergie n'est pas seulement un marché. C'est un enjeu de sécurité nationale. Un rapport de force. Quand nous importons du pétrole et du gaz, nous importons en même temps les crises des autres »*, a expliqué le Premier ministre, le 10 avril.

Cette électrification des usages a déjà commencé. Les énergéticiens de tous bords savent que l'exercice n'est pas simple. Il faut passer des gisements situés dans quelques régions du monde à une production diffuse partout où le soleil brille et le vent souffle ; et sup-



La consommation française d'électricité stagne depuis 2010 autour de 450 TWh, tandis que la production est en excès.

THIERRY GRUN/ONLYFRANCE.FR

Accélérée par les crises énergétiques récentes, l'électrification des usages a pour objectif de réduire la dépendance du pays aux importations, mais elle permet également de diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

primer une logistique du derrick à la station-service — passant par la raffinerie, le tanker, le pipeline — pour y substituer un réseau de lignes à haute et basse tension reliant producteur et consommateur.

Inverser le système des heures creuses et pleines

Si les énergies fossiles sont affaire de tonnes et de barils à transporter (que l'on peut facilement stocker), le réseau électrique exige, lui, un équilibre constant entre la production et la consommation, au risque de faire sombrer le système de distribution. L'électrification des usages doit donc s'accompagner d'une augmentation corrélée de la production.

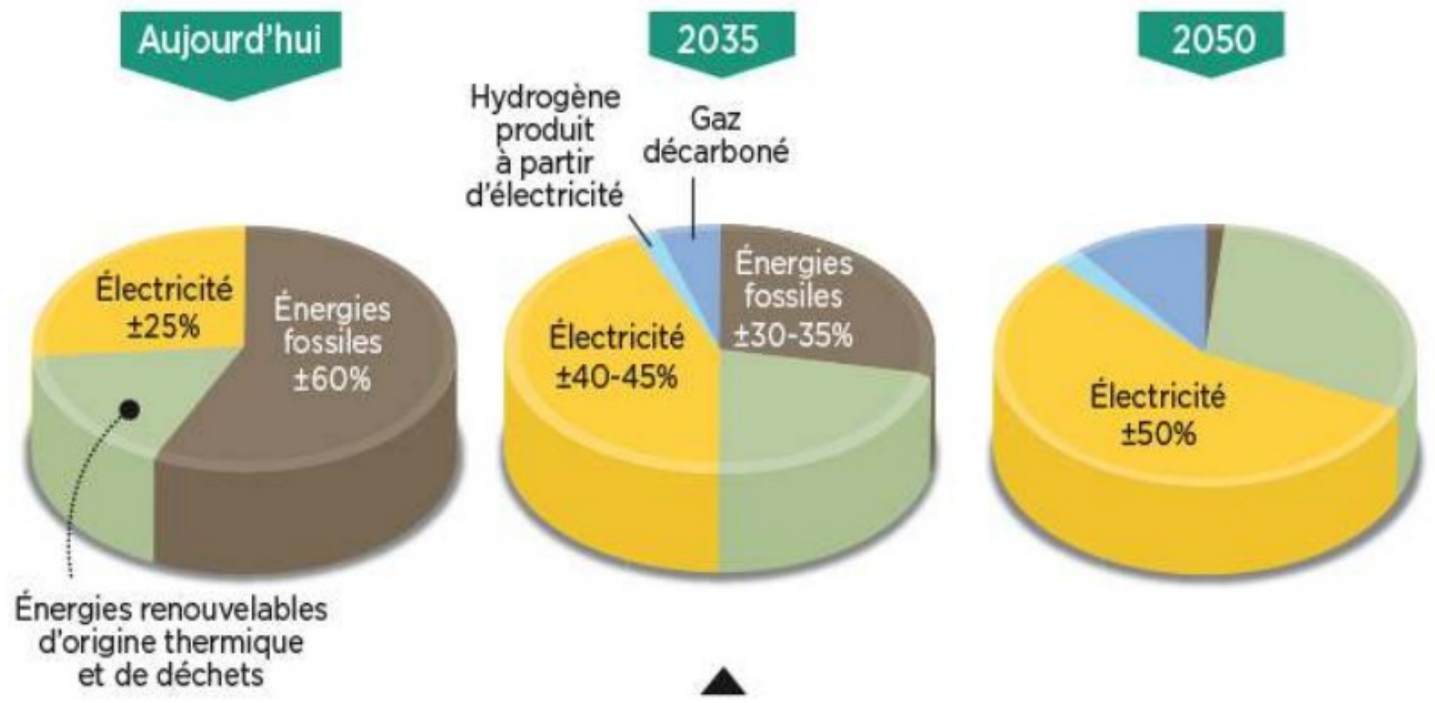
C'est le travail du gestionnaire du réseau électrique de haute tension RTE, qui a publié en décembre 2025 son bilan prévisionnel pour la prochaine décennie. Prenant acte des effets de la crise de 2022, RTE fait un premier constat : après avoir craint la pénurie d'électricité à l'hiver 2022, la France se retrouve désormais avec un excès de production qui amène à des prix négatifs sur les marchés. Des parcs éoliens et solaires ferment lors des pics de surproduction. C'est une vraie surprise. Depuis 2015 et la première stratégie nationale bas carbone (SNBC), la part des énergies fossiles doit régulièrement diminuer face à l'électrification. « *Alors que les objectifs de sortie des énergies fossiles et de souveraineté industrielle et numérique doivent conduire à basculer de nombreux usages énergétiques vers l'électricité, la consommation ne s'est pas encore infléchie à la hausse* », écrit RTE.

En maintenance en 2022, le parc nucléaire est en pleine production en 2025 tandis que l'éolien, avec 1 gigawatt (GW) par an supplémentaire, et le solaire (+4 à 5 GW) ont continué leur progression. RTE révèle ainsi que sur l'ensemble de 2025, les prix moyens de l'électricité entre 18 heures et 21 heures ont été 111 % supérieurs à ceux entre 10 heures et 18 heures. En conséquence, de nombreux opérateurs sur le marché de l'énergie ont proposé à leurs clients d'inverser le système des heures creuses et pleines, en garantissant des prix plus bas l'après-midi plutôt que la nuit.

Si les énergies fossiles sont affaire de tonnes et de barils à transporter, le réseau électrique exige, lui, un équilibre constant entre la production et la consommation

La consommation, en revanche, stagne depuis 2010 autour de 450 TWh *(voir le graphique p. 42)*. À cela plusieurs raisons. L'efficacité énergétique produit ses effets à plein : les entreprises investissent dans des machines moins énergivores ; l'éclairage par LED finit de s'implanter ; le pilotage des consommations des bâtiments, tant chez les particuliers que dans le tertiaire, se répand. De plus, les politiques de sobriété, dans les entreprises et les foyers, perdurent. La France a, par ailleurs, continué à perdre des usines. Enfin, les atermoiements des politiques publiques sur les aides à la rénovation des bâtiments, la diffusion des pompes à chaleur et des véhicules électriques ont freiné l'électrification des usages.

Évolution de la part des différentes énergies dans la consommation finale



Une diminution progressive des énergies fossiles est attendue d'ici à 2050 au profit de l'électricité et des énergies décarbonées, selon le scénario de RTE.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : RTE

Redémarrage confirmé du programme nucléaire

RTE a donc préconisé de réduire les ambitions en matière de déploiement des énergies renouvelables, plutôt que de prôner la mise en sommeil de réacteurs nucléaires. Le gestionnaire confirme en outre ses investissements sur le réseau électrique de 100 milliards d'euros d'ici à 2035, pour moderniser les lignes et leur permettre d'absorber cette production décentralisée. *« Ces investissements visent à se substituer à des dépenses opérationnelles récurrentes d'importations de combustibles fossiles, et ne constituent donc pas des dépenses nettes »*, précise RTE, qui répond ainsi aux attaques du Rassemblement national et d'une partie des Républicains. L'extrême droite estime en effet que l'intermittence des énergies renouvelables coûte une fortune aux Français, et qu'il faut donc stopper totalement ces investissements. Adoptée par décret le 12 février, la troisième PPE a entériné le rapport de RTE tout en sauvegardant, malgré tout, l'essentiel de la progression du solaire et de l'éolien, qui emploient désormais en France 400 000 personnes. Elle entérine également le redémarrage du programme nucléaire, avec 6 EPR qui commenceront à produire en 2038. *« Fermer de manière anticipée des réacteurs nucléaires ou arrêter complètement le développement des renouvelables écarterait la possibilité d'une décarbonation rapide à l'horizon de 5-10 ans »*, estime RTE.

Le blocage du détroit d'Ormuz à partir du 28 février a rebattu les cartes. Le prix du baril a de nouveau dépassé la barre des 100 dollars (comme en 2022). Le 10 avril, Sébastien Lecornu a donc accéléré. Le soutien public à l'électrification passe de 5,5 à 10 milliards d'euros par an d'ici à 2030, avec l'objectif de réduire la part des énergies fossiles de 60 % de la consommation finale à 40 % en 2030, et moins de 30 % en 2035 (*voir le graphique ci-dessus*). Dans son scénario le plus ambitieux, RTE visait les 40 % pour… 2035. Aides à la conversion des chauffages au gaz vers les pompes à chaleur, subventions des véhicules et camions électriques, incitations à la conversion des industriels : le coup d'accélérateur est réel.

Le prix de l'essence à la pompe se révèle une nouvelle fois être un puissant levier dans la lutte contre le changement climatique. Alors que les émissions de gaz à effet de serre ont diminué de moins de 2 % depuis trois ans, le plan d'électrification pourrait permettre à la France de retrouver un rythme de -5 %, compatible avec l'objectif de réduction de 42 % de ses émissions d'ici à 2030. Et cela, grâce à un président des États-Unis qui ne croit pas à la réalité du réchauffement de la planète. ■ **Loïc Chauveau**

PRODUCTION

Le boom mondial des énergies renouvelables

Le monde commence à sortir des énergies fossiles, au moins pour le secteur énergétique. C'est le constat du bureau d'études britannique Ember. Les 38 États développés membres de l'OCDE génèrent désormais plus d'électricité à partir de sources renouvelables que de charbon, gaz ou pétrole. La part de ces derniers dans les mix énergétiques est ainsi passée de 63 % en 2007 à 48 % en 2025. Sur cette période, le solaire a augmenté sa production de 2138 térawattheures (TWh), contre une hausse de 1313 TWh pour les fossiles. Pour la première fois en 2025, les énergies renouvelables ont répondu entièrement à la croissance annuelle de la demande en électricité. Hors OCDE, pour la première fois aussi, la part des fossiles dans l'énergie a baissé de 0,9 % en Chine et de 3,3 % en Inde.

Un biomatériau inspiré du calamar

Une protéine présente dans les ventouses de l'animal marin permettrait de produire un plastique biodégradable dans la mer. Un enjeu majeur de préservation de nos océans.

Et si une solution contre la pollution plastique venait de l'océan ? Ou plutôt de l'un de ses habitants, le calamar, qui pourrait produire un plastique biodégradable. C'est l'idée du projet Bioplastics from the deep (Bioplastiques des profondeurs, en français), qui vient d'être sélectionné parmi 300 projets innovants par la fondation Pure Ocean, un fonds de dotation qui finance des projets scientifiques internationaux pour protéger l'océan et sa biodiversité. Chez le calamar, ce sont surtout les dents annulaires présentes sur certaines ventouses leur permettant d'agripper leurs proies qui retiennent l'attention des chercheurs. Les protéines qui les composent s'organisent en un réseau dont la structure évoque celle des soies d'araignées, tout en étant plus résistantes. Leur nom : les suckerines.

« Plus petites que les protéines de soie d'araignée, les suckerines sont réputées plus faciles à produire en laboratoire », explique Julia Jansing, chercheuse en biotechnologie moléculaire appliquée à l'université de Maastricht (Pays-Bas). Les dents de l'animal présentent, en outre, un comportement thermoplastique : chauffées, elles peuvent ramollir, être remodelées, puis se solidifier et se rigidifier lors du refroidissement. *« C'est un comportement extrêmement inhabituel pour un matériau à base de protéines, dont la plupart se dégradent à des températures élevées. »* D'où l'idée de se lancer dans une production de protéines de suckerin-18 à plus grande échelle *« dans le but de les utiliser comme biomatériaux sans avoir à capturer des calmars ».*

HANS HILLEWAERT

Les dents des ventouses de l'animal, très résistantes et biodégradables, ont des propriétés thermoplastiques.

La suckerin-18, candidate pour des applications médicales

Pour cela, son équipe intègre un gène au génome d'un organisme facile à cultiver en laboratoire, en l'occurrence la variété de tabac *Nicotiana benthamiana* et la bactérie Escherichia coli. Si la première donne peu de résultats, E. coli permet *« de multiplier par 5 à 10 le rendement en protéines par rapport à de précédentes études »,* se réjouit Julia Jansing. Elle optimise ensuite les conditions de culture des cellules et la purification de la protéine obtenue. Reste à adapter le processus à grande échelle, en utilisant un petit bioréacteur. Une fois purifiée et séchée, la protéine se présenterait sous forme de poudre qui, mélangée à un plastifiant et chauffée, permettrait d'obtenir une masse souple et malléable.

Une production conséquente sera nécessaire afin de comparer ses propriétés à celles des polymères couramment utilisés. Déjà, *« en matière de biodégradabilité, la protéine semble faire ses preuves »,* annonce la scientifique, évoquant des résultats bientôt publiés. Une étape majeure dans la future fabrication de produits commercialisables à base de suckerin-18.

Dans un premier temps, elle *« ne pourra cependant pas rivaliser avec les plastiques de masse bon marché ni les remplacer, car elle sera encore trop coûteuse »,* concède Julia Jansing. Mais elle pourrait déjà être intéressante dans le secteur médical pour des films autocicatrisants, des hydrogels et dans l'ingénierie tissulaire dédiée à la régénération des organes. Un premier pas prometteur. ■

Caroline Douteau

La faillite de la lutte contre les nuisibles

Une étude menée par le Muséum national d'histoire naturelle remet en question la politique actuelle de gestion des espèces animales dites « nuisibles ». Elle serait aussi inefficace que coûteuse.

« *Aucune preuve n'existe d'un quelconque bénéfice lié à l'effort de contrôle* » des espèces considérées comme nuisibles en France. C'est la conclusion, notée noir sur blanc, des chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) livrée dans une étude publiée en mars dernier dans la revue *Biological Conservation*. En France, 1,7 million de renards, de mustélidés et de corvidés sont abattus chaque année, avec pour volonté affichée de réduire les risques sanitaires et les pertes économiques liées notamment à l'atteinte aux cultures et à l'élevage. Les chercheurs du MNHN ont donc évalué économiquement et écologiquement les conséquences d'un tel contrôle sur une durée de sept ans, de 2015 à 2022.

L'étude s'est concentrée sur dix « *espèces susceptibles d'occasionner des dégâts* », dont le renard roux, la fouine, la martre des pins, la corneille noire ou encore le geai des chênes. Tous les trois ans, un décret national précise pour chaque département les efforts de contrôle qui doivent être fournis pour chaque espèce localement, et sur les trois années à venir. Les données permettant normalement de mieux comprendre la dynamique entre dommages et quota d'abattage des « espèces nuisibles » posent un problème dès le départ : les agriculteurs et les particuliers peuvent déclarer le type de dégât et proposer eux-mêmes une estimation de son coût et de l'espèce qu'ils pensent responsable. La méthode de déclaration n'est pas standardisée et cette déposition ne fait l'objet d'aucun contrôle organisé. C'est sur ces informations que se basent ensuite les arrêtés nationaux concernant les espèces nuisibles.

L'augmentation des abattages ne réduit pas les dommages

En épluchant les registres consignant les dégâts occasionnés par les espèces et le résultat des saisons de chasse, les auteurs de la nouvelle étude démontrent que la politique actuelle est totalement inefficace, voire contre-productive, pour un coût exorbitant. Ainsi, selon leurs estimations, le coût nécessaire pour la gestion de ces espèces est compris entre 103 et 123 millions d'euros chaque année. En outre, les raisons pour lesquelles certaines espèces sont ciblées sur une durée de trois ans restent obscures. En effet, l'étude souligne que ses auteurs n'ont « *pas réussi à trouver de relations significatives entre l'ampleur des dégâts signalés au cours d'une période triennale et le nombre d'abattages au cours de la période triennale suivante* ». Elle remarque également que chez les oiseaux, l'abattage ne réduit pas la taille des populations nicheuses. Par ailleurs, l'augmentation des abattages ne diminue pas non plus ensuite le nombre de dommages constatés par les agriculteurs et les particuliers, ni les coûts occasionnés par ces dégâts. À l'inverse, une diminution ou une absence totale d'abattage n'augmente pas les dommages ensuite. Pour les scientifiques, il s'agit du « *message à retenir* ».

Le coût des dommages occasionnés par ces espèces est évalué entre 8 et 23 millions d'euros par année, un chiffre largement inférieur au coût de la gestion de ces « nuisibles », même lorsque celui-ci est minoré. « *La lutte létale serait économiquement justifiable si les dépenses*

FRÉDÉRIC JIGUET

« Ces espèces sont indigènes, donc elles ont leur place dans notre écosystème. On pourrait chiffrer les services qu'elles rendent »

Frédéric Jiguet, ornithologue et biologiste de la conservation, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

OLGER DUTY / BIA / BIOSPHOTO

Le geai des chênes, oubliant certaines réserves de glands qu'il a cachées dans les bois, contribue à la régénération forestière.

estimées des activités de lutte étaient inférieures, ou au moins égales, aux gains financiers correspondant à la réduction des coûts des dommages causés par les ravageurs. Ce n'est pas le cas pour les oiseaux et mammifères vertébrés nuisibles indigènes en France », assènent les chercheurs du MNHN. Ils proposent de repenser totalement la gestion de ces espèces afin de remplacer une méthode qui crée plus de problèmes qu'elle n'en résout. « *L'abattage sélectif étant inefficace, économiquement injustifiable et éthiquement discutable, nous recommandons de concentrer d'urgence les efforts sur la réduction et la prévention des dommages, ce qui ne requiert pas de mesures létales* », écrivent-ils.

Coauteur de l'étude, le professeur Frédéric Jiguet précise qu'« *il faudrait, par exemple, protéger les semis et les cultures avec des techniques répulsives d'enrobage. Aujourd'hui, un produit existe mais il est très toxique* ». Autre solution : mettre au point des systèmes d'effarouchement plus efficaces que ceux déjà existants. « *Ces derniers (bruits de coup de feu, épouvantail qui se gonfle) se déclenchent en continu, ce qui fait que les oiseaux intelligents s'habituent et n'ont plus peur,* indique le chercheur. *On pourrait, par exemple, en cas de présence de nombreux oiseaux, déclencher de vrais cris d'alarme de corvidés. Ils se rapprocheront alors et là, il sera possible de déclencher les bruits de coup de feu ou l'épouvantail.* »

103 à 123 millions d'euros
Le coût nécessaire chaque année pour la gestion des espèces « nuisibles ».

8 à 23 millions d'euros
Le coût annuel des dommages causés par ces espèces.

SOURCE : MNHN

Un rapport de l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (publié en 2024) recommandait de son côté de ne pas renouveler la méthode de la gestion sur trois ans, qui expire en 2026. Il proposait plutôt de mettre « *en œuvre un nouveau système de gestion collégiale* » de ces espèces. En attendant, les chercheurs du Muséum d'histoire naturelle recommandent « *davantage de normalisation, de vérification et de transparence* » concernant les déclarations de dommages.

L'abattage de ces espèces pose un autre problème de taille. Il réduit à néant les rôles écosystémiques que jouent ces animaux, des avantages dont profite l'humanité. « *Par exemple, le geai des chênes fait des réserves de glands en automne, mais il oublie ensuite plusieurs cachettes,* indique Frédéric Jiguet. *De cette façon, il sème des chênes dans toute la forêt et permet la régénération forestière. Le renard mange des campagnols qui font partie du cycle de vie des tiques porteuses de la maladie de Lyme. Aussi les corvidés sont des charognards et permettent de se débarrasser des animaux morts en ville ou dans les campagnes.* » Et d'ajouter : « *Ces espèces sont indigènes, donc elles ont leur place dans notre écosystème. On pourrait tout aussi bien chiffrer les services qu'elles rendent.* » ■

Anne-Sophie Tassart

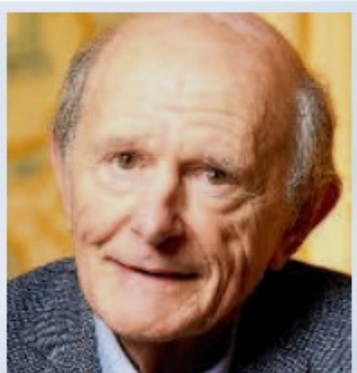
CORPS ET ESPRIT

Les bienfaits de la marche

Cette fonction fondamentale de l'être humain est beaucoup plus qu'un simple mode de déplacement. Une pratique régulière de la marche stimule de nombreux mécanismes protecteurs aussi bien physiques que psychologiques.

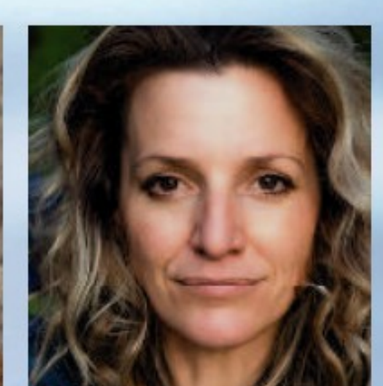
DOSSIER RÉALISÉ PAR
Thaïs de Bastard, Cécile Coumau, Émilie Gillet, Hervé Ratel et Agnès Vernet

AVEC

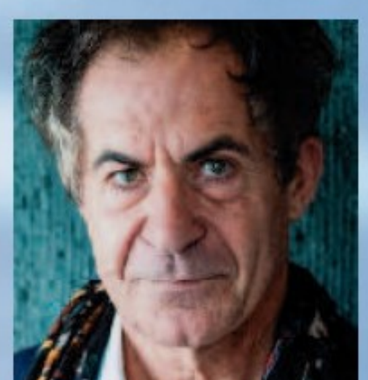


Jean-Louis Étienne
p. 51

Clémence Beretta
p. 53



Sarah Marquis
p. 56



Étienne Klein
p. 58

Blandine Pluchet
p. 61

Jacques Tassin
p. 63

SOMMAIRE

PHYSIOLOGIE
Un moyen simple d'améliorer sa santé globale p. 50

PSYCHOLOGIE
Quand la marche agit contre l'anxiété et la dépression p. 55

RECOMMANDATIONS
La règle des 10 000 pas quotidiens a vécu p. 59

ÉTUDE
Les bénéfices économiques des déplacements à pied p. 62

PIEDS NUS
Une autre marche est possible p. 64

SHUTTERSTOCK

Un moyen simple d'améliorer sa santé globale

Première mise en mouvement, la marche a de nombreux effets bénéfiques sur les muscles, les articulations et le système cardio-vasculaire pour les personnes malades comme en bonne santé. Mais si l'on veut en tirer pleinement bénéfice, il faut pratiquer sur des terrains en pente et à des rythmes modérément soutenus.

Fonction fondamentale de notre espèce, la marche n'est pourtant plus aujourd'hui un simple mode de déplacement. C'est *« le premier moyen d'améliorer la santé globale »*, selon Joffrey Zoll, chercheur spécialiste de l'activité physique à la faculté de médecine de l'université de Strasbourg. Pourquoi ? *« Parce que l'espèce humaine a évolué avec la marche,* Homo sapiens *est un marcheur et il a donc utilisé l'activité physique comme un activateur physiologique »,* poursuit le scientifique. Mettre un pied devant l'autre déclenche ainsi de nombreux processus physiologiques protecteurs, au point d'être désormais reconnu comme un élément indispensable à la santé. Avoir un mode de vie de marcheur réduit la mortalité liée aux accidents cardio-vasculaires de 36 % selon une étude de 2017 menée par des chercheurs de l'université de Glasgow (Royaume-Uni).

Une autre étude, publiée en octobre dernier par des chercheurs espagnols, américains et australiens montre que, d'après les données sur plus de 30 000 adultes suivis pendant près de huit ans, marcher de manière continue plus de 15 minutes par jour réduit la mortalité, à nombre de

GETTY IMAGES

La pratique de la marche est recommandée à tous les âges et contribue à la prévention des maladies. ◀

pas égal, en comparaison avec le fait de marcher 5 minutes par-ci par-là. *« Il y a un effet "dose" de la marche,* reconnaît Joris Mallard, chercheur spécialiste de l'activité physique au sein de l'Institut de cancérologie Strasbourg Europe. *Plus on la pratique en volume dans la journée et en session, plus on active ses bienfaits physiologiques. » (Lire p. 59.)*

Un travail sur l'équilibre et la proprioception

Marcher intéresse les médecins d'abord parce que cela garantit de rester actif. Chaque pas sollicite les muscles des jambes, mais aussi les systèmes cardio-vasculaire et respiratoire. Cela entretient la condition physique et évite que la moindre blessure n'entraîne l'immobilisation, ce qui pourrait faire basculer dans la sédentarité. *« On peut marcher sans modération : c'est accessible, cela ne demande pas d'équipement particulier et tout le monde peut y trouver une forme d'effort »*, précise Joris Mallard.
Surtout, les effets sont démultipliés dès qu'on ne marche pas que sur du plat. *« En descente, le travail des muscles est* ▶

TÉMOIGNAGE

JEAN-LOUIS ÉTIENNE
MÉDECIN ET EXPLORATEUR

Un merveilleux outil de liberté

« Je ne suis pas un vrai marcheur. Moi, je vais d'un point à un autre avec un objectif. Ma plus grande marche a eu lieu quand je suis parti au pôle Nord, en 1986. J'ai mis un pied devant l'autre pendant 63 jours, et si j'ai résisté à la tentation de l'abandon, c'est à cause de cette envie irrépressible d'atteindre mon but. Lors de mes expéditions en bateau, nous débarquions aussi souvent pour faire une marche. Quand vous êtes sur un espace confiné, sortir et se dégourdir les jambes est essentiel à l'équilibre du groupe. Le climat s'apaise immédiatement. À mes yeux, c'est l'outil n° 1 de l'évasion, 100 % à notre portée. La marche offre des possibilités de conquête personnelle accessible. Et comme je me suis toujours octroyé la liberté d'inventer ma vie, elle fait partie intégrante de mon quotidien. Moi qui suis né à la campagne, je me suis inventé des expéditions très jeune. Adolescent, je dressais la liste du matériel nécessaire pour partir en randonnée seul en plein hiver ! Et même quand je ne suis pas en expédition, je marche encore beaucoup. À Paris, lorsque je suis en période d'écriture et que je me sens dans une impasse, je pars faire un tour sur l'île aux Cygnes. J'ai l'impression de redonner de la souplesse à mon cerveau en me concentrant sur mon environnement. Ma pensée devient ensuite plus fluide. Une vitesse relativement lente permet une sorte de fusion avec le paysage. De plus, comme pour moi la solitude est une compagne, la marche m'offre ces moments d'isolement dont j'ai besoin. Par ailleurs, l'ex-interne en chirurgie orthopédique que je suis ne peut être que fasciné par la marche. C'est un acquis génétique d'une précision remarquable. Je suis admiratif de la complexité de fonctionnement de la hanche et, encore plus, du genou. La marche, c'est vraiment fabuleux ! »

Propos recueillis par C. C.

LEA CRESPI / PASCO&CO

PRÉVENTION

Ne pas confondre inactivité et sédentarité

Du point de vue physiologique, il existe une grande différence entre ne pas faire de sport et ne pas bouger. On parle d'inactivité pour la première option et de sédentarité pour la deuxième. Et pour être sédentaire, il suffit de passer plusieurs heures sur une chaise ou allongé… Toute ressemblance avec le mode de vie urbain contemporain n'étant pas fortuite. Selon l'Organisation mondiale de la santé, *« la sédentarité est un facteur de risque majeur de maladies non transmissibles ainsi que la quatrième cause principale de décès prématuré dans le monde »*. Et il est possible d'être un sportif sédentaire, car il n'est pas si simple de corriger la sédentarité. Joris Mallard l'explique : *« Pour contrecarrer les effets délétères de la sédentarité, il ne suffit pas de marcher. Il faut des activités de haute intensité et à haute dose ! »* Une revue systématique de la littérature parue en 2018 dans le *British Journal of Sports Medicine,* portant sur plus de 800 000 personnes, a calculé qu'il faut une activité équivalente à pas moins de 6 heures de vélo d'intensité modérée chaque semaine pour effacer les risques cardio-vasculaires et de cancer liés à la sédentarité… **A. V.**

dit excentrique. C'est un exercice en résistance qui permet de développer la force et stimule la régénération osseuse », insiste Stéphane Perrey, chercheur en neurophysiologie de la motricité humaine à l'université de Montpellier. La recherche sur l'activité physique a montré que tous les exercices n'agissaient pas de la même manière sur les tissus. Ainsi, pour développer de la force, ce qui protège les os et les articulations, mieux vaut résister que pousser ; c'est exactement ce que fait le muscle lorsqu'il amortit les pas dans une pente. Celle-ci devra ensuite être remontée, pour le plus grand plaisir du cœur et du système respiratoire. *« La marche est une question d'équilibre. En permanence, en terrain accidenté, le corps travaille son équilibre, au niveau du cerveau mais aussi des entrées sensorielles périphériques »,* complète Stéphane Perrey. On active ainsi la proprioception, la perception du corps dans l'espace, qui s'appuie sur des capteurs logés dans les muscles, les tendons et les articulations, ainsi que les neurones de la vue et du tonus musculaire qui concourent à l'équilibre.

PHILIPPE ROY / AURIMAGES

La descente permet de développer la force en amortissant le pas dans la pente.

De plus, selon une étude norvégienne portant sur plus de 10 000 personnes, publiée en juin 2025 dans la revue *Jama Network,* cette pratique permet de réduire les maux de dos. Les chercheurs ont mesuré que marcher plus de 100 minutes par jour réduisait le risque de maux de dos chroniques de 23 % en comparaison avec les personnes qui marchent moins de 78 minutes en moyenne chaque jour. Selon cette équipe, la durée de la promenade compte plus que l'intensité. Une étude coréenne de 2014 avait déjà montré que cet effet antidouleur lombaire était renforcé pour les femmes âgées avec la marche nordique, qui propose d'utiliser des bâtons pour engager aussi le haut du corps dans l'exercice. *« En marchant avec des bâtons, on adopte une attitude qui favorise le gainage et donc réduit la lombalgie »,* abonde Stéphane Perrey.

Une diminution du risque de plusieurs pathologies

L'activation des muscles a aussi des effets au-delà du mouvement. *« Quand il est sollicité, le muscle sécrète des myokines »,* précise Joris Mallard. Parfois qualifiées d'hormones de jouvence, celles-ci sont produites au moment de la contraction puis diffusées dans le tissu environnant et dans le sang. La plus connue est l'interleukine 6. Sécrétée lors de l'exercice, elle déclenche une cascade de signaux qui favorisent le contrôle de la réponse inflammatoire.

Chez des personnes souffrant d'un trouble métabolique débutant, comme un diabète de type 2 très récent ou des signes de résistance à l'insuline, la marche régulière évite même l'installation de la pathologie, selon une étude américaine publiée en 2020 dans *Jama.* Joffrey Zoll le confirme : *« On peut arriver à un estompement des symptômes de la maladie et même, pour certaines personnes, à un arrêt de la prise de médica-*

ments avec une association de la marche et du renforcement musculaire. » Une simple marche de 10 minutes après le repas réduit l'hyperglycémie chez des adultes en bonne santé, confirme une autre étude japonaise parue en 2025. En activant le système respiratoire, la marche promeut aussi la sécrétion de molécules antioxydantes. *« C'est particulièrement vrai pour l'exercice chronique d'intensité basse à modérée »,* précise le spécialiste. Sa pratique quotidienne, à une cadence qui sollicite un peu le système cardio-vasculaire, constitue donc une activité idéale. *« Le bon indicateur est qu'on arrive à parler même si on peine à tenir les conversations »,* indique Joris Mallard.

La cadence, un élément important pour la prévention

Le rythme de la marche est d'ailleurs un élément clé pour prévenir les maladies. *« On distingue les marcheurs lents des marcheurs rapides,* explique Heinz Freisling, du Centre international de recherche sur le cancer de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), qui a travaillé sur cette question. *Pour les rapides, qui marchent jusqu'à être légèrement essoufflés, la marche est une activité physique modérée. »* Cette distinction est essentielle car, outre le fait de marcher un certain volume de pas dans la journée *(lire p. 59),* la cadence est un indicateur important de santé globale. Pour preuve, *« les gens qui marchent vite ont un risque de cancer du poumon 40 % moins grand que les marcheurs lents. Et cela est vrai pour les non-fumeurs comme pour les fumeurs. Néanmoins, pour ces derniers, le risque reste notablement supérieur à celui des non-fumeurs, même marcheurs lents »,* précise le spécialiste, qui a publié ces résultats en collaboration avec des chercheurs de Ratisbonne (Allemagne) l'an passé. C'est une activité également très étudiée dans les centres de lutte contre le cancer, parce qu'elle réduit les effets indésirables de la chimiothérapie, comme les dommages cardiaques, nerveux ou le brouillard mental.

PHILIPPE MILLEREAU / KMSP / AFP

TÉMOIGNAGE

CLÉMENCE BERETTA

ATHLÈTE

Le sport le plus pratiqué au monde

Mon père étant président d'un club d'athlétisme dans les Vosges, j'ai grandi immergée dans le milieu sportif. J'ai exploré toutes les disciplines de l'athlétisme, mais c'est la marche rapide qui m'a conquise. Je me suis tout de suite sentie à l'aise avec cette gestuelle particulière. J'avais 11 ans. J'ai alors poursuivi ma spécialisation jusqu'au plus haut niveau, en établissant le record de France féminin sur 20 km et en participant aux jeux Olympiques de Paris, en 2024. Bien sûr, la marche rapide est une discipline différente de la marche commune. Le *tempo* y est soutenu, et les vitesses atteintes se rapprochent de celles des coureurs de marathon ou de semi-marathon. Ces performances, encore peu connues du grand public, contribuent pourtant depuis quelques années à redorer l'image de cette pratique. Ainsi, ce sport s'est rajeuni et gagne en popularité. Il est toutefois exigeant. En tant qu'athlète, il est facile de se laisser submerger par la pression des objectifs et de perdre de vue ce que l'on est en train d'accomplir concrètement. C'est pourquoi il me tient à cœur de trouver dans ma pratique un équilibre entre performance et écoute de soi. Selon les jours, je marche en écoutant de la musique ou un podcast, ou bien sans distractions, pour laisser libre cours à mes pensées. J'y trouve un outil de rééquilibrage précieux, tant sur l'aspect physique que nerveux. Je glisse rapidement dans un état quasi méditatif, et c'est souvent dans ces moments-là que surgissent de bonnes idées — que je m'arrête pour noter. Par ailleurs, il m'importe de rappeler le caractère accessible de la marche. Là où le mot « sport » peut démotiver, et où la course peut également rebuter une partie des gens, la marche s'offre à tous : douce, sans contrainte, sans équipement particulier. Il s'agit d'ailleurs du sport le plus pratiqué au monde. Finalement, en tant que bipède, il me semble primordial de revenir à l'essentiel : se mettre en mouvement, un pied devant l'autre, en particulier dans un contexte de sédentarité croissante."

Cet effort modéré aide à éviter d'accumuler de la masse graisseuse. *« La marche augmente le métabolisme de base, c'est-à-dire multiplie par 3 ou 4 la consommation d'énergie du corps à un instant* t *»,* précise Stéphane Perrey. On consomme donc plus d'énergie, ce qui évite que les lipides s'accumulent *« et provoquent de l'inflammation de bas grade »,* complète Joffrey Zoll. Cette accumulation de graisse favorise le développement de nombreuses maladies métaboliques et chroniques.

JOFFREY ZOLL

« Sapiens est un marcheur et il a donc utilisé l'activité physique comme un activateur physiologique »

Joffrey Zoll, chercheur spécialiste de l'activité physique à la faculté de médecine de l'université de Strasbourg

Un atout pour les personnes âgées et les malades chroniques

« La marche est protectrice contre le diabète de type 2. Elle aide à réduire la résistance à l'insuline et on a un "effet fréquence". Dix minutes tous les jours procurent déjà un effet positif et cela permet d'augmenter progressivement la dose, rappelle Joffrey Zoll. *Cela aide aussi à lutter contre tous les troubles métaboliques, dont l'obésité, mais aussi l'insuffisance cardiaque, l'hypertension artérielle, la bronchite pulmonaire obstructive chronique et les maladies pulmonaires. » « C'est une entrée dans l'activité physique, elle peut être pratiquée par tous! »* insiste de son côté Joris Mallard. La marche est recommandée pour les personnes avec des maladies chroniques et bien sûr pour les personnes âgées, qui doivent entretenir leur condition physique afin d'éviter les maladies et prévenir les risques de chute. Mais elle est également un atout à d'autres âges de la vie.

Marcher est aussi particulièrement intéressant pour les femmes durant la grossesse. Nathalie Boisseau, professeure en physiologie du sport à l'université Clermont Auvergne, précise : *« Elle peut être pratiquée par la plupart des femmes enceintes sans risque de chute ou de blessure, avec des bienfaits pour leur santé et celle de leur bébé. »* Le Collège national des sages-femmes de France recommande ainsi aux femmes enceintes de marcher au moins 150 minutes par semaine, par session de 30 minutes, en association avec du renforcement musculaire. Une revue de la littérature à propos des athlètes de haut niveau enceintes a aussi documenté comment l'activité physique des mères, quelle que soit son intensité, contribuait au bien-être des fœtus, en stimulant leur rythme cardiaque et leur oxygénation.

Nager, danser, pédaler, courir, tout est bon pour aller mieux

La marche est, par ailleurs, recommandée très souvent lors de la ménopause. Une étude menée en 2024 à l'université de Surakarta, en Indonésie, montre comment sa pratique améliore la santé osseuse et articulaire des femmes durant cette période. Les femmes invitées à marcher 1,6 kilomètre tous les jours pendant 8 semaines ont présenté des signaux d'inflammation réduits, un taux d'œstrogène supérieur et une meilleure densité osseuse que le groupe de contrôle.

Mais attention, la marche n'est qu'une entrée dans l'exercice physique. *« Elle est nécessaire à la santé mais non suffisante »,* avertit Joris Mallard. Toutes les données le confirment : il est important de varier les allures et les activités, de faire du vélo ou de nager, d'associer du renforcement musculaire à un entraînement plus cardio, et de se faire plaisir pour bouger autant que possible. ■ **A. V.**

DÉPISTAGE

Marcher pour détecter les maladies

***« L'analyse de la marche apporte de nombreuses informations sur l'état du cerveau et des fonctions cognitives »,* affirme le Dr Bernard Auvinet, rhumatologue et médecin du sport. Aussi, son observation fournit de véritables biomarqueurs pour certaines pathologies. Voici les principales qui ont été documentées.**

▸ **MALADIE DE PARKINSON** petits pas, tronc penché vers l'avant, bras peu mobiles, épisodes de blocage au démarrage.

▸ **AVC** hémiplégie, raideur, jambes qui frottent, pas en ciseaux, troubles de l'équilibre.

▸ **SCLÉROSE EN PLAQUES** fatigabilité, troubles de la coordination.

▸ **ALZHEIMER** troubles de la coordination et du repérage dans l'espace.

▸ **TROUBLES DE L'OREILLE INTERNE** tangage, besoin d'appuis.

▸ **NEUROPATHIES PÉRIPHÉRIQUES** perte de sensibilité dans les pieds, le pied se lève exagérément pour éviter de buter.

▸ **ATAXIES** (pathologies neurodégénératives se traduisant par des troubles de la coordination) : marche hésitante et irrégulière, élargissement de l'appui, déséquilibre.

▸ **HYDROCÉPHALIE À PRESSION NORMALE** marche lente, instable, les jambes écartées, les pieds semblent collés au sol. **T. B.**

MATTHIEU RONDEL / HANS LUCAS POUR SCIENCES ET AVENIR

Le mouvement de la marche a des effets positifs sur notre cerveau (ici, une séance psychothérapeutique de « walk and talk »).

Anxiété, dépression : quand marcher guérit

L'activité physique est reconnue comme un levier contre la dépression. Mais toutes les pratiques n'ont pas les mêmes effets. La marche, par son intensité modérée, mobilise des mécanismes spécifiques — biologiques, cognitifs et sensoriels — qui favorisent l'apaisement et la régulation des émotions.

Record battu ! Le 12 avril, près de 60 000 personnes étaient sur la ligne de départ du Marathon de Paris. Et pour la moitié d'entre elles, c'était une première. La course à pied n'a jamais fait autant d'adeptes. À l'heure où la sédentarité est responsable de 5,3 millions de morts par an dans le monde, qui pourrait se plaindre de cette mode ? Cependant, si le *running* s'impose comme la recette du bien-être, une autre forme d'activité physique gagnerait, elle aussi, à être mise en lumière. C'est la marche. Elle mérite pourtant une attention particulière, notamment pour ses effets sur la santé mentale. Et d'abord pour une raison simple : la marche est une activité physique à part entière, contrairement à ce que l'on pense. La définition même de l'activité physique donnée par l'Assurance-maladie le prouve : c'est l'ensemble des mouvements du corps produits par les muscles, entraînant une dépense d'énergie supérieure à celle qui est dépensée au repos. De simples gestes du quotidien, comme marcher pour se rendre au travail, faire ses courses ou descendre une station de métro plus tôt, peuvent donc agir sur notre santé.

Or, ce mouvement du corps n'est pas sans effet sur l'esprit. *« Depuis vingt ans, on s'est rendu compte que Descartes s'était trompé ! Notre cognition — c'est-à-dire notre manière de penser — est liée à la façon dont nous bougeons »,* souligne Benoît Bardy, professeur en sciences du mouvement à l'université de Montpellier. *« Des hypothèses crédibles postulent désormais l'existence d'une réelle boucle biologique entre l'appareil musculaire et le cerveau »,* ajoute Éric Griez, psychiatre et auteur de *La Marche-Thérapie* (Eyrolles, 2022). Une interaction permanente, qui contribue à réguler les émotions et la perception du stress. Cette boucle prend racine dans l'effort lui-même. Lorsque nos muscles s'activent, ils libèrent des myokines, des molécules de signalisation qui circulent dans le sang et peuvent franchir la barrière hémato-encéphalique. Une fois à destination, ces myokines contribuent à déclencher la production d'une pro-

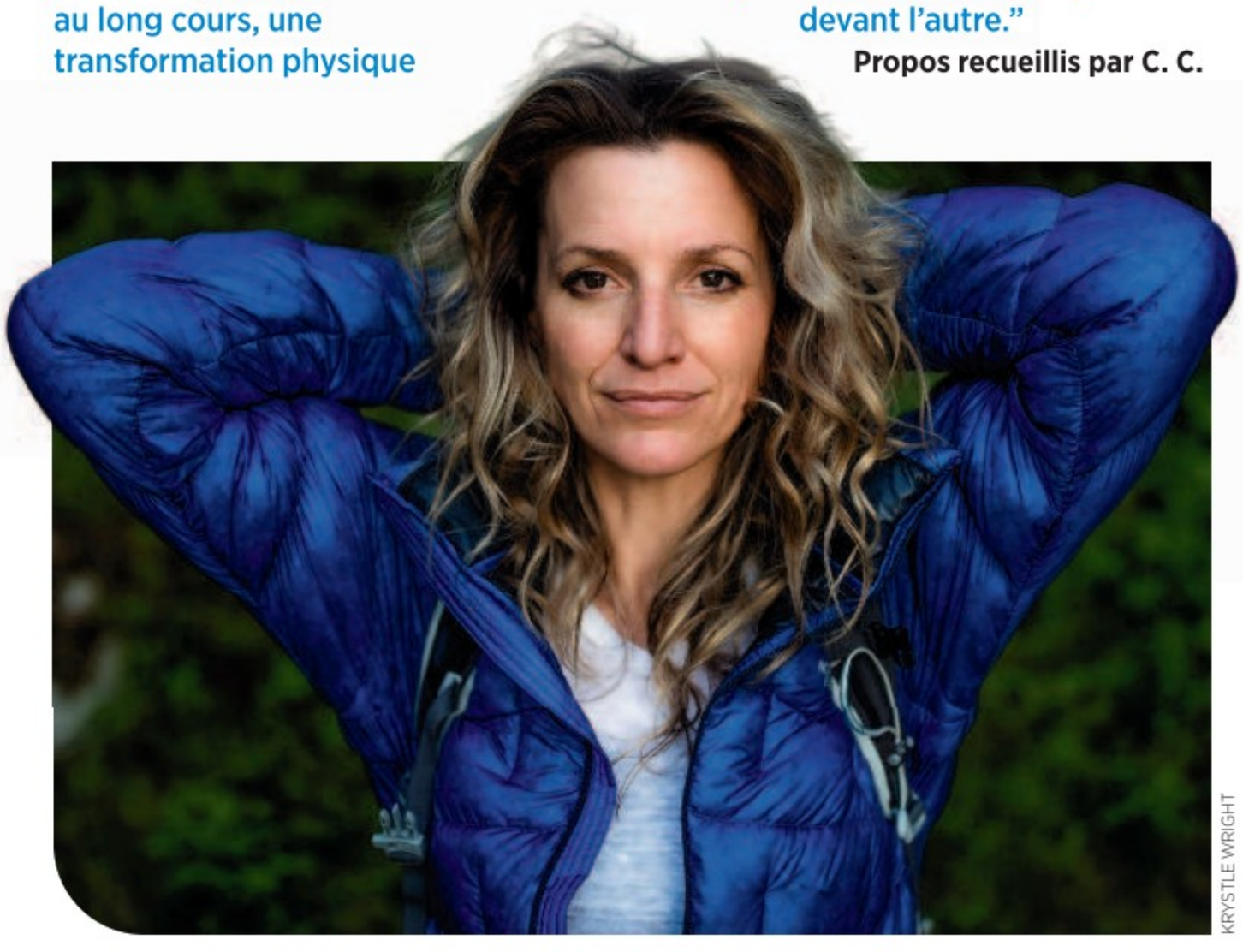
TÉMOIGNAGE

SARAH MARQUIS
EXPLORATRICE

L'expérience du dénuement

“Dans le nord-ouest de la Suisse, ma région d'origine, la marche, c'est culturel. Le dimanche, tout le monde part en balade. Petite, je n'aimais pas cela. Je rêvais sans cesse de nature, de toucans de toutes les couleurs. C'est pour aller à la rencontre de ce monde-là, que j'admirais dans les pages du *National Geographic,* que je me suis mise à marcher. Afin d'avoir de l'argent de poche et de m'acheter ce magazine, j'allais dans le jardin. En ramassant 100 limaces, je gagnais 1 euro ! Peu à peu, la curiosité m'a donc poussée dehors.
Progressivement, j'ai compris que la vitesse de la marche permettait de mieux percevoir notre environnement, et de s'intégrer à lui. La prise de conscience est même allée plus loin. En marchant, je me suis rendue compte que l'humain n'est pas au sommet d'une chaîne ; nous sommes la nature. Et puis, quand on pratique les marches au long cours, une transformation physique mais aussi spirituelle s'opère. Nous faisons l'expérience du dénuement. Et notre esprit bascule dans l'instant présent. C'est notamment pour m'inscrire dans cette démarche que je marche seule. Le retour sur moi-même, l'introspection facilitent le lien que je développe avec la nature. En tant que spécialiste de la survie, je marche dans des conditions extrêmes. Je suis, par exemple, allée à pied de la Sibérie à l'Australie, soit 20 000 km que j'ai parcourus en trois ans. Ce genre d'expédition permet d'aiguiser ses sens. Par exemple, je parviens à sentir l'eau dans l'air. En fait, j'ai développé une forme d'animalité. Autrement dit, la marche n'est pas juste un outil, une manière de se déplacer. Elle nous offre une incroyable harmonie avec la nature. Et l'enfant qui n'aimait pas marcher a, finalement, fait une fois le tour de la planète en mettant un pied devant l'autre.”

Propos recueillis par C. C.



KRYSTLE WRIGHT

téine clé : le facteur neurotrophique dérivé du cerveau (BDNF). *« C'est un véritable engrais pour notre cerveau,* explique Éric Griez. *Il favorise la survie des neurones, renforce leurs connexions et soutient la plasticité cérébrale. »* Toutefois, contrairement aux apparences, ces mécanismes ne jouent pas seulement sur la cognition. En agissant notamment dans l'hippocampe, une région impliquée dans la mémoire comme dans la régulation du stress, le BDNF aide le cerveau à mieux s'adapter et à sortir des états émotionnels négatifs. Plus fascinant encore, ces messagers musculaires pourraient exercer un effet anti-inflammatoire, protégeant le tissu nerveux contre cette « inflammation silencieuse » de plus en plus associée aux troubles anxieux et dépressifs.

Le balayage visuel latéral du paysage réduit l'anxiété

L'efficacité est telle que la Haute Autorité de santé préconise officiellement, depuis 2019, l'activité physique en première intention pour traiter les épisodes dépressifs légers à modérés et l'anxiété. Une méta-analyse, publiée en 2024 dans le *British Medical Journal (BMJ),* a même montré que la marche ou le jogging figuraient parmi les plus bénéfiques, avec des effets comparables à ceux des traitements de référence comme les antidépresseurs ou la psychothérapie. Mais ces mécanismes ne suffisent pas à expliquer ce qui fait la singularité de la marche pour notre santé mentale. Il suffit d'ailleurs de tenter l'expérience : une marche sans objectif précis, sans écouteurs, n'a rien à voir avec une séance de sport. À l'inverse, la course à pied, souvent associée à des objectifs de performance, à la mesure du temps ou au partage des résultats sur des applications comme Strava, peut maintenir une forme de pression qui laisse moins de place à cette disponibilité mentale.
Cette absence d'exigence en fait une pratique beaucoup plus accessible. C'est d'ailleurs son premier atout. Conseiller à une personne dépressive de se mettre

APPROCHE THÉRAPEUTIQUE

Le « walk and talk »: sortir du cabinet pour faciliter la parole

À l'entrée du parc, la séance commence en marchant. Pas de fauteuil, pas de divan: un patient et son psychologue avancent côte à côte, au même rythme. Appelée *Walk and talk therapy* (« thérapie par la marche et la parole » en français), cette approche consiste à mener une séance de psychothérapie dehors, en marchant. Encore peu répandue en France, cette pratique, qui a vu le jour outre-Atlantique, commence à peine à faire l'objet de recherches. Une étude pilote (publiée en 2025) montre qu'à amélioration comparable, les patients dépressifs rapportent moins de stress et d'anxiété lorsqu'ils marchent. Selon l'Association américaine de psychologie, ce cadre favorise des échanges plus informels et une plus grande aisance dans l'expression. Selon d'autres travaux, il faciliterait d'ailleurs l'expression émotionnelle chez les hommes, souvent moins enclins à verbaliser. Marcher ensemble modifierait la relation thérapeutique. Le face-à-face disparaît, et avec lui, une partie du sentiment de jugement. La psychologue Mélissa Vidal a mis en place des séances en extérieur: *« Je constatais une résistance au travail. Beaucoup de patients ruminent, restent bloqués dans leurs croyances. Ils se cramponnent au fauteuil et n'avancent plus. Le corps est immobile, et la pensée aussi. Le mouvement permet alors de relancer quelque chose.* » Dans sa pratique, le cadre naturel n'est pas neutre. *« Le chemin, ses bifurcations, la pluie… On peut s'appuyer sur ce qui se passe autour de nous pour mettre des mots sur ce qui se passe à l'intérieur* », décrit-elle. Certaines séances intègrent aussi des temps de méditation. Elle utilise en particulier cette approche auprès de patients souffrant de traumatismes, ou de troubles de l'attachement. *« La nature apporte quelque chose de sécurisant, de stable, presque de l'ordre de la permanence…* » **C. C.**

au *running* risque fort de se solder par un échec. *« Les médecins doivent mettre une grosse énergie pour convaincre leurs patients dépressifs de se mettre en mouvement »,* confie Éric Griez.

Cependant, la différence fondamentale est encore ailleurs. Là où un effort violent, comme la course, « éteint » partiellement le cortex préfrontal pour se concentrer sur l'effort — offrant un soulagement par le vide —, la marche, elle, maintient cette zone de la réflexion éveillée. Cette disponibilité cognitive permet à l'esprit de rester actif sans être saturé. Qui n'a pas fait l'expérience de voir surgir des idées inattendues, au détour d'une rue ou d'un chemin, sans effort particulier. C'est cet état particulier qui booste la créativité de 60 %, comme l'a démontré l'université Stanford dans une étude parue dans le *Journal of Experimental Psychology,* en 2014. Pourtant, laisser ainsi la pensée libre pourrait sembler à double tranchant: ne risque-t-on pas de ruminer davantage? C'est ici qu'intervient la mécanique du flux optique. En marchant, le balayage visuel latéral du paysage envoie un signal neurologique d'apaisement immédiat à l'amygdale, le centre de l'anxiété. Ce mécanisme, proche de la thérapie EMDR, désactive physiquement l'alerte cérébrale. Autrement dit: la marche ne fait pas le vide, elle fait le tri. Et le rythme plutôt lent de la marche permet de profiter pleinement de ce que l'écologue Anne-Caroline Prévot appelle la « fascination douce ». Contrairement à l'attention dirigée, épuisante, notre attention se repose alors en se laissant captiver, sans efforts, par des éléments naturels — le mouvement des feuilles ou des vagues.

> « Notre cognition — c'est-à-dire notre manière de penser — est liée à la façon dont nous bougeons »
>
> **Benoît Bardy,** professeur en sciences du mouvement à l'université de Montpellier

Le taux de cortisol diminue et le relâchement s'installe

Cette spécificité se joue enfin au cœur de notre système hormonal. Le patient déprimé souffre souvent d'un taux de cortisol (l'hormone du stress) chroniquement élevé. Or, plus une activité est intense, plus elle déclenche une nouvelle production de cortisol pour soutenir l'effort. Là où la course peut ajouter du stress biologique à la détresse psychologique, la marche agit comme un régulateur. Des travaux ont montré qu'à une intensité correspondant à une marche tranquille ou modérée, le taux de cortisol circulant dans le sang diminue par rapport au taux mesuré au repos. Ce qui se traduit, sur le terrain, par une sensation de relâchement pro-

gressif, loin de l'essoufflement et de la tension d'un effort intense. En parallèle, cette sollicitation douce *« relancerait la production de sérotonine et de dopamine, les neurotransmetteurs de l'apaisement et de la motivation,* indique Éric Griez. *Les mêmes leviers que les antidépresseurs… »*

Le système nerveux s'accorde avec la régularité des pas

Enfin, au-delà de la chimie, la marche soigne par son rythme. Pour Benoît Bardy, marcher agit comme un métronome pour le système nerveux. La régularité du pas impose une structure stable, là où la dépression installe le chaos. Le chercheur souligne un point clé : *« Les émotions négatives sont antagonistes avec la synchronisation. »* Autrement dit, la tristesse nous replie sur nous-mêmes et nous rend rigides, alors que la synchronisation (se caler sur un rythme ou sur le pas d'un autre) demande de l'ouverture et de la fluidité.

Et cela ne demande aucun effort, car c'est un principe physique. *« De la même manière que deux pendules finissent par battre ensemble, notre corps cherche naturellement à s'accorder au rythme de celui qui nous accompagne. C'est la synchronisation sociale »,* explique Benoît Bardy. En marchant au même pas qu'un autre, le patient sort de son isolement sans même avoir besoin de parler. Le chercheur ajoute que cet effet est dopé lorsque l'on écoute de la musique. Cet impact du rythme, décuplé par la mélodie, a été confirmé par une étude de grande ampleur publiée, début 2024, dans le *BMJ.* Elle montre, en effet, que la danse est l'activité physique la plus efficace pour réduire les symptômes de la dépression, devant la marche, le yoga ou encore le qi gong.

Finalement, peu importe la discipline. Que l'on préfère le silence d'une forêt, le cliquetis des bâtons de marche ou l'énergie d'un cours de danse, l'important est de réamorcer la pompe. En remettant le corps en mouvement, on invite l'esprit à faire de même. ■ **C. C.**

MAYLIS ROLLAND / HANS LUCAS

TÉMOIGNAGE

ÉTIENNE KLEIN

PHYSICIEN ET PHILOSOPHE DES SCIENCES

La violation du principe d'inertie

“Une fois n'est pas coutume : la pratique de la marche donne raison à Aristote plutôt qu'à Galilée. Comment ? En venant contester le principe d'inertie. En effet, lorsqu'on marche, le déplacement ne se vit plus passivement comme un simple changement de coordonnées dans l'espace : il devient un processus de transformation du corps en mouvement et de celui qui l'habite. Le corps s'éprouve, se muscle, se densifie, tandis que son occupant ressent de façon très concrète qu'à mesure qu'il change de position dans l'espace, il change aussi de disposition intérieure. Quant au temps, il perd son uniformité et sa neutralité ordinaires : sa texture se module au gré des variations du rythme du pas. Je le confesse : j'aime passionnément marcher et courir, en particulier sur des terrains accidentés et riches en reliefs. Car dans mon référentiel existentiel, le mouvement et la vie demeurent intimement corrélés : sentir son souffle, l'entendre même, c'est doper à la fois la sensation d'habiter son corps et le sentiment d'exister. En devenant sonore, la respiration amplifie et précise joyeusement la perception que nous avons de nous-mêmes. Chacun d'entre nous l'a éprouvé : tout « transport physique » change l'état d'esprit, et même l'état de l'esprit : on ne rentre jamais comme on était parti. Chaque fois qu'on tourne provisoirement le dos à une forme d'enlisement dans le monde, on se désinstalle de soi-même : quelque chose se modifie en soi, jusque dans l'activité physico-chimique du cerveau, grâce, dit-on, à la libération d'un cocktail de substances — endorphines, sérotonine, dopamine… — qui interviennent dans les sentiments de bien-être et de motivation. En termes moins savants, je parlerais plutôt de purge bienfaitrice, ou de prière laïque : autre rapport au monde, au corps, à soi, aux autres, au temps qui passe ; légèreté neuve, tranquille, souriante de l'être tout entier. Après une longue marche, on s'entend bien mieux avec la réalité.”

La règle des 10 000 pas quotidiens a vécu

Cette injonction aurait des effets contre-productifs en démotivant les plus sédentaires. Pour certains chercheurs, l'objectif des 7000 pas par jour est plus réaliste. D'autres estiment même que la distance importe peu.

Cinq fruits et légumes par jour, au moins sept heures de sommeil, 1,5 litre d'eau, 10 000 pas quotidiens… On ne compte plus les injonctions chiffrées pour nous maintenir en bonne santé. Certaines ont pourtant des origines moins scientifiques que d'autres. Et lorsque les objectifs sont trop difficiles à atteindre, ils peuvent avoir un effet contre-productif et dissuader bon nombre d'entre nous de s'y mettre… Comme ces fameux 10 000 pas par jour, qui représentent tout de même 6 à 8 kilomètres, soit une heure et demie à deux heures de marche quotidienne. Alors, que se cache-t-il derrière ce nombre et qu'en dit réellement la science ?

À l'origine de ce concept, un podomètre créé dans les années 1960 par un horloger japonais et nommé manpokei, qui signifie « jauge pour dix mille pas ». Tout simplement parce que l'idéogramme nippon signifiant 10 000 évoque la silhouette d'une personne qui marche ! Et comme ce nombre est facile à retenir, les médias puis les médecins s'en sont largement emparés. *« C'est avant tout une belle histoire marketing qui a longtemps été déclinée par certaines politiques de santé publique et qui, ensuite, a été rattrapée par la science »*, s'amuse le Pr Jean-François Toussaint, cardiologue dans le service de médecine du sport et activités physiques adaptées à l'hôpital Hôtel-Dieu, à Paris. Depuis une vingtaine d'années en effet, notamment avec l'essor des podomètres puis des smartphones et des montres connec-

OSXAR WONG / GETTY IMAGES

Le conseil de faire 10 000 pas/jour vient d'un idéogramme japonais signifiant 10 000 et ressemblant à des pas, sans base scientifique.

tées, les études scientifiques se sont multipliées pour établir un lien formel entre le nombre de pas quotidiens et la réduction des risques sanitaires. En 2019, par exemple, une équipe américaine a montré que chez des femmes de plus de 70 ans, la mortalité est plus basse chez celles qui marchent 4400 pas par jour par rapport à celles qui n'en font que 2700. Une autre étude, publiée en 2020, montrait quant à elle que pour chaque palier de 1000 pas supplémentaires par jour, on observe une réduction de la mortalité toutes causes confondues de 12 %. Ce bénéfice s'observait dès 2700 pas par jour et jusqu'à 17 000. En juillet 2025, la revue *The Lancet Public Health* a sonné la fin du match en publiant la plus vaste revue systématique à ce jour sur le sujet : 57 études ont été retenues et 31 d'entre elles ont même donné lieu à une méta-analyse, c'est-à-dire une analyse statistique combinant toutes leurs données. Et les auteurs de conclure : *« Même si 10 000 pas par jour peuvent encore constituer un objectif viable pour ceux qui sont plus actifs, 7000 pas par jour sont associés à des améliorations cliniquement significatives des résultats en matière de santé et pourraient constituer un objectif plus réaliste et réalisable pour certains. »* Doit-on pour autant fixer à 7000 pas par jour le nouvel objectif de santé publique ? Pas si simple…

> « On constate que la marche est bénéfique, quelle que soit la distance et sans effet palier »
>
> **Jean-François Toussaint,** cardiologue dans le service de médecine du sport et activités physiques adaptées à l'Hôtel-Dieu, à Paris

« Si l'on regarde en détail les résultats, on constate que la marche est bénéfique, quelle que soit la distance et sans effet palier », insiste Jean-François Toussaint. Ainsi, en prenant comme référence 2000 pas par jour, on constate par exemple une réduction de 36 % du risque de mortalité toutes causes confondues simplement en doublant la distance, soit 4000 pas par jour. Le risque est réduit de 47 % pour 7000 pas par jour, et cela dépasse les 50 % de réduction au-delà de 11 000 pas par jour. Autrement dit, *« la plus grande part de réduction du risque initial est observée chez les personnes qui ne marchaient quasiment pas et qui s'y mettent un peu »,* explique la Pr Martine Duclos,

ZONES URBAINES

Nous marchons de plus en plus vite

En analysant avec l'IA des vidéos filmées dans des centres-villes aux États-Unis, des chercheurs ont découvert qu'entre 1980 et 2010, la vitesse de marche avait augmenté de 15 %. *« Nous avons mesuré la vitesse de marche dans les centres-villes de New York, Boston et Philadelphie : en trente ans, elle est passée d'environ 4,4 km/h à 5 km/h, avec une diminution de moitié du temps passé à flâner. À cela s'ajoute une nette réduction du nombre d'interactions dans ces espaces publics »,* atteste Arianna Salazar-Miranda, enseignante en urbanisme à l'université Yale. Les rues sont désormais perçues comme des couloirs de circulation, plutôt que comme des espaces de rassemblement et d'interaction sociale. La marche urbaine est devenue un moyen de transport efficace pour de courtes distances, vidée de toute dimension exploratoire ou contemplative.

La densité de population joue par ailleurs un rôle déterminant. Selon le Withings Health Institute, dont les analyses s'appuient sur les données de montres connectées, plus une zone est peuplée, plus les gens pressent le pas. En France, Paris et sa couronne présentent la cadence de marche la plus élevée, devant Lyon, Nantes et Strasbourg, suivies de plus petites villes comme Bayonne et Limoges. **T. B.**

BERTLMANN/GETTY IMAGES

La cadence de marche la plus élevée en France est observée à Paris et sa couronne, devant Lyon, Nantes et Strasbourg.

cheffe du service de médecine du sport au CHU de Clermont-Ferrand, et présidente de l'Observatoire national de l'activité physique et de la sédentarité (Onaps). Alors que celles qui marchent déjà 6000 pas par jour et vont en faire mille de plus pour atteindre ces fameux 7000 pas n'auront qu'un seul pourcent de gain sur le plan de la mortalité…
Des effets similaires sont observés quant au risque de maladies cardiovasculaires et, dans une moindre mesure, celui de cancers : ils diminuent dès lors que le nombre de pas dépasse les 2000 par jour et cela, même au-delà des 7000 retenus par les auteurs de cette méta-analyse. *« Plutôt que de fixer un objectif chiffré qui serait le même pour tous, mieux vaut encourager les gens à marcher un peu plus qu'ils ne le font déjà, en tenant compte de leur état de santé et aussi de leur disponibilité »*, résume donc Martine Duclos.

L'activité physique n'est pas nécessaire tous les jours

D'autres études se sont intéressées à la vitesse de marche. S'il en ressort qu'une cadence élevée a plus d'effets bénéfiques sur la santé, pour la médecin clermontoise, *« cet effet reste mineur par rapport au nombre de total de pas effectués dans la journée. Mieux vaut donc ne s'intéresser qu'à celui-là pour ne pas brouiller le message »* et risquer de décourager les personnes avec un état de santé dégradé, les seniors ou celles en situation de handicap.
Enfin, pas de culpabilité si vous n'arrivez pas à marcher tous les jours et concentrez votre activité en fin de semaine : *« Plusieurs études portant sur ceux qu'on appelle les "week-end warriors" ont montré que 150 à 300 minutes d'activité physique ont le même impact sur la réduction de la mortalité, qu'elles soient réparties sur cinq à sept jours ou seulement sur deux jours dans la semaine »*, précise Martine Duclos. Oubliez donc les chiffres et les objectifs, et marchez, tout simplement dès que vous le pouvez, comme vous le pouvez ! ■ **É. G.**

ASTRID DI CROLLALANZA /OPALE.PHOTO/ LEEXTRA

TÉMOIGNAGE

BLANDINE PLUCHET
PHYSICIENNE ET AUTEURE

Vivre les paysages

"La marche fait partie de ma vie professionnelle. C'est le mouvement par lequel les idées naissent, la pensée se structure, les livres se construisent. Et même si l'espèce humaine sait faire du vélo ou rouler en voiture, la marche reste le moyen de locomotion privilégié de notre corps. Elle ne nécessite aucun outil supplémentaire, ni roue, ni moteur. Son rythme est parfait pour aborder la nature, c'est la cadence idéale pour observer le monde. Elle active les cinq sens. Le corps en mouvement accroît les perceptions sensorielles. Dans cette action, je deviens plus sensible à ce qui se passe autour de moi, à ce que je vois, aux odeurs, aux sons de la nature ou au vent sur ma peau. Ce mouvement et ce rythme me font me sentir en accord avec la vie même, ils renforcent mon lien avec le monde naturel.
Mes écrits comme mes marches constituent des explorations du monde naturel. J'ai publié plusieurs récits à propos de la science accessible par l'exploration du monde qui nous entoure, le ciel, les nuages… Mes balades sont l'occasion de faire ces observations, elles constituent mes sources d'inspiration.
La marche est aussi un moyen de rencontrer le public ou les scientifiques. Je l'utilise ainsi beaucoup dans mes interventions. Avec des élèves en primaire, je les invite à faire l'expérience de la marche, une invitation à regarder par eux-mêmes leur environnement, dans une démarche d'exploration à leur échelle, que je peux enrichir de connaissances scientifiques. J'ai le sentiment que cette expérience favorise leur apprentissage.
Je propose également, depuis plusieurs années, une marche à l'aube, au cours de laquelle je raconte l'histoire de l'Univers depuis la formation des étoiles, des planètes jusqu'à aujourd'hui, le monde vivant que nous habitons. Et quand, juste après l'heure bleue, les marcheurs voient les étoiles disparaître pour ne laisser que les planètes apparentes, puis qu'ils commencent à entendre les premiers chants d'oiseaux, j'ai l'impression que cette marche leur permet de faire l'expérience du récit.
La marche donne l'opportunité de vivre les paysages, de relier les connaissances au sensible."

Propos recueillis par A. V.

JULIE GUICHES / PINK / SAIF IMAGES

Ce que nos pas rapportent à l'économie

D'après une récente étude de l'Agence pour la transition écologique (Ademe), favoriser les déplacements à pied génère 57 milliards d'euros d'économies chaque année, dont une réduction des dépenses de santé et des gains de productivité chez les actifs.

La marche est le mode de déplacement le plus universel, le plus économique et le plus pratiqué et, pourtant, il est le moins étudié par les sciences économiques et le moins considéré par les politiques publiques. *« On produit des études sur la voiture, le train, le vélo… Mais très peu sur la marche. Comme si c'était trop évident ! »* remarque Mathieu Chassignet, ingénieur transports et mobilité à l'Ademe, l'agence de la transition écologique. C'est précisément pour déterminer les intérêts socio-économiques de la marche à l'échelle nationale que l'Ademe a conduit l'année dernière une vaste étude* sur le sujet, s'appuyant sur un corpus de 130 sources bibliographiques.

La première révélation de ce rapport, c'est l'ampleur de nos trajets à pied, minorée par des statistiques qui ne tiennent compte, en général, que des déplacements réalisés à l'extérieur et de façon unimodale. Dans ce cas, la marche arrive après la voiture. Or, *« les statistiques de mobilité orientent les politiques publiques »,* rappelle Frédéric Héran, économiste des transports à l'université de Lille, qui a contribué à cette étude. Mais si, comme le fait la Suisse par exemple, on prend aussi en compte la marche intermodale (les trajets pour rejoindre sa voiture ou l'arrêt de bus), celle effectuée chez soi, au travail et dans les espaces publics (gares , centres commerciaux,…), ainsi que les promenades et randonnées, cela change la donne : le rapport révèle ainsi que nous marchons, en moyenne, 72 minutes par jour, soit environ 3,5 kilomètres ! Plus que le temps passé en voiture, environ une heure par jour travaillé, selon la dernière enquête du ministère des Transports sur la mobilité des Français (2019).

Le second objectif de ce travail est de chiffrer les bénéfices socio-économiques en ne considérant, cette fois, que les trajets effectués à pied à l'extérieur, car ce sont ceux que les politiques publiques peuvent influencer. Favoriser les déplacements à pied génère 57 milliards d'euros d'économie par an, estime l'Ademe.

BIEN-ÊTRE

Marcher en forêt ou en ville : des effets inversés

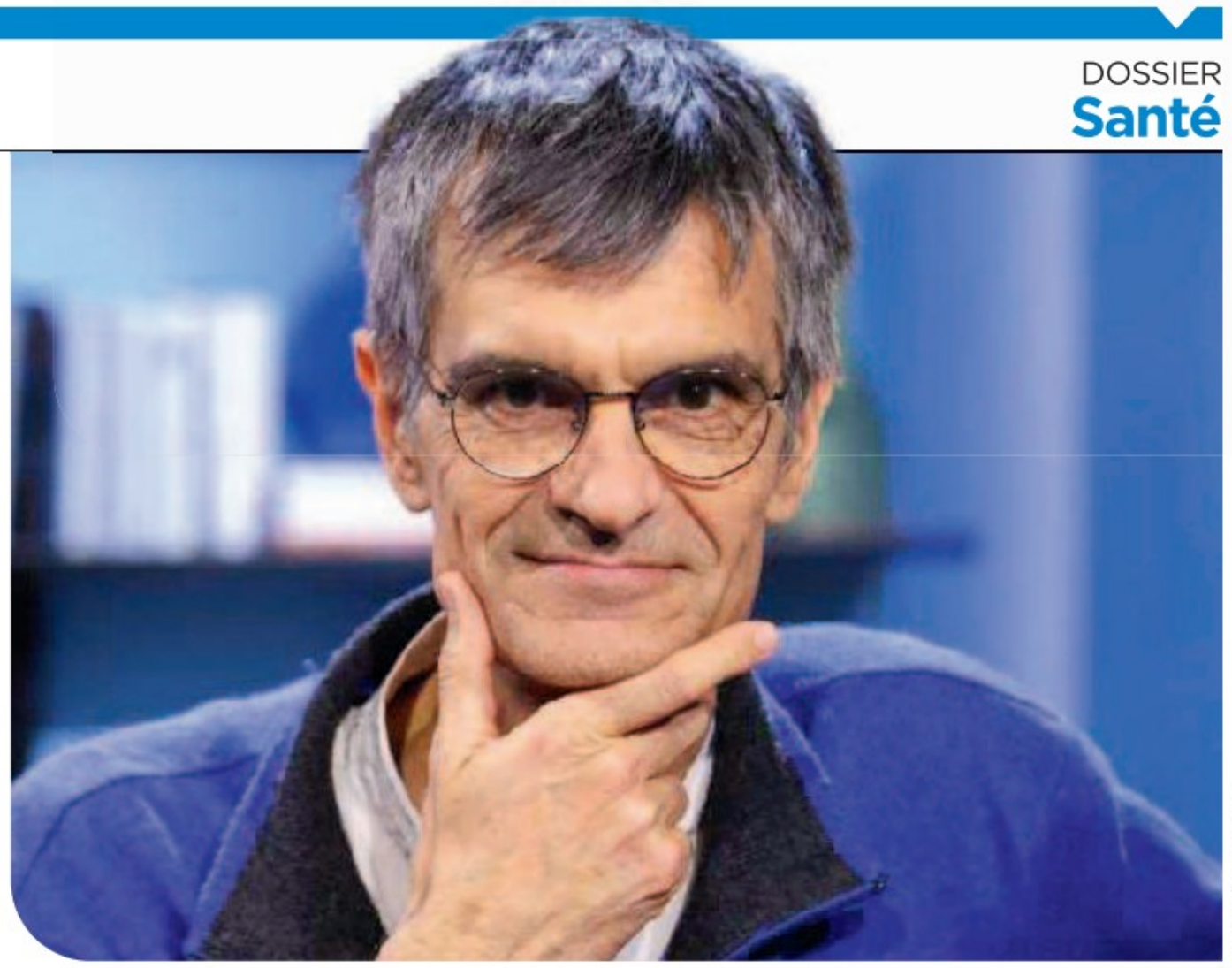
Les méta-analyses sur la question sont unanimes : marcher dans un environnement naturel réduit significativement l'anxiété, la dépression et le rythme cardiaque. Tandis qu'en milieu urbain, la marche a tendance à aggraver un peu l'anxiété, sans effets notables sur les autres facteurs. Les chercheurs expliquent cet écart par deux théories de psychologie environnementale. La première, celle de la réduction du stress de l'Américain Roger Ulrich, postule qu'en raison de notre histoire évolutive, les environnements naturels déclenchent une réponse émotionnelle rapide réduisant le cortisol (l'hormone du stress). La seconde, la « théorie de la restauration de l'attention », de Rachel et Stephen Kaplan, établit qu'en immersion dans la nature, nous sollicitons une attention plus diffuse, qui favorise la récupération de la fatigue cognitive. À l'inverse, la marche en ville impose souvent une vigilance continue et d'intenses *stimuli* visuels et sonores, même si les parcs offrent des refuges… T. B.

Le bénéfice le plus évident : la marche réduit nos dépenses de santé de 16,7 milliards d'euros par an et représente 1,9 milliard d'euros d'économie par an pour les ménages ; ce qui correspond en majorité au carburant non dépensé. Plus 7,5 milliards d'euros pour les collectivités locales quant à la réduction des dépenses de voirie : à surface égale, *« les trottoirs et les espaces pour les piétons sont moins coûteux à construire et à entretenir que les chaussées »*, précise Mathieu Chassignet.

Des actifs plus productifs car en meilleur état de santé

Mais le principal bénéfice révélé par cette étude, ce sont les gains de productivité des actifs, qui s'élèvent à 19,7 milliards d'euros par an ! *« Cela s'explique par un meilleur état de santé, donc moins d'absentéisme au travail, un moindre* turn-over *des salariés, mais aussi une meilleure concentration et moins de stress »,* détaille l'ingénieur. Un autre avantage, étonnant, du côté des enfants cette fois, concerne les 2,1 milliards d'euros de bénéfices annuels dus à une plus grande autonomie de ceux-ci : la marche *« libère leurs proches de contraintes liées à l'accompagnement et génère pour eux un gain de temps et de moindres dépenses de carburant ».*

Enfin, autre nouvelle intéressante : la marche représente un gain de 0,87 milliard par an pour les commerces de proximité. Le rapport souligne, en effet, que, contrairement à une idée reçue, favoriser la marche au détriment des voitures s'accompagne d'un réel gain économique. *« Les études montrent que lorsqu'une*



ALAMO/MARC SOYEZ

TÉMOIGNAGE

JACQUES TASSIN

ÉCOLOGUE ET AUTEUR

Éprouver une forme d'unité avec le vivant

Sans réellement le formaliser, la marche fait partie de mon processus de recherche. En tant que forestier et écologue, il m'est impossible d'appréhender une forêt sans marcher. Mes travaux m'ont amené à sillonner les forêts tropicales de Madagascar, de La Réunion et de la République démocratique du Congo, aussi bien sur les pistes balisées qu'en dehors des sentiers battus. Ainsi, en plus de la réflexion intellectuelle, il y a un véritable engagement du corps dans ma démarche scientifique.

La marche est aussi un plaisir personnel, que je cultive chaque jour. Ce rituel m'est indispensable car il me met en présence avec le monde qui m'entoure. Novalis, poète romantique et géologue allemand, écrivait : *« J'appelle nature la communauté merveilleuse où nous introduit notre corps. »* Cette formule me parle profondément, je suis persuadé qu'on ne peut appréhender la nature sans passer par l'engagement de notre corps, sinon l'approche reste intellectuelle et désincarnée.

La marche me semble être le moyen le plus efficace et le plus doux pour réaliser cette mise en présence. C'est le seul mode de déplacement qui laisse une telle liberté de mouvement : s'arrêter, regarder, changer de direction. Les sens y sont pleinement sollicités : le chant des oiseaux, les odeurs des sous-bois, la texture des plantes. Il m'est arrivé, en forêt, d'éprouver ce qu'on appelle un sentiment océanique, une forme d'unité avec le vivant.

Ce que je regrette, c'est que toutes ces sensations s'amenuisent dès que l'on marche en groupe. Pourtant, rien de mieux que la marche pour délier les langues et nouer des liens. Mais, à plusieurs, il est plus difficile de se connecter à la nature. En ce sens, la marche appelle à la solitude.

La marche est enfin, à mes yeux, un puissant outil d'éveil à la conscience écologique. Les préoccupations environnementales prennent racine dans cette relation sensible ; chez les enfants qui ont noué tôt un lien avec le monde naturel, comme chez les adultes qui ont su entretenir ce lien."

Propos recueillis par T. B.

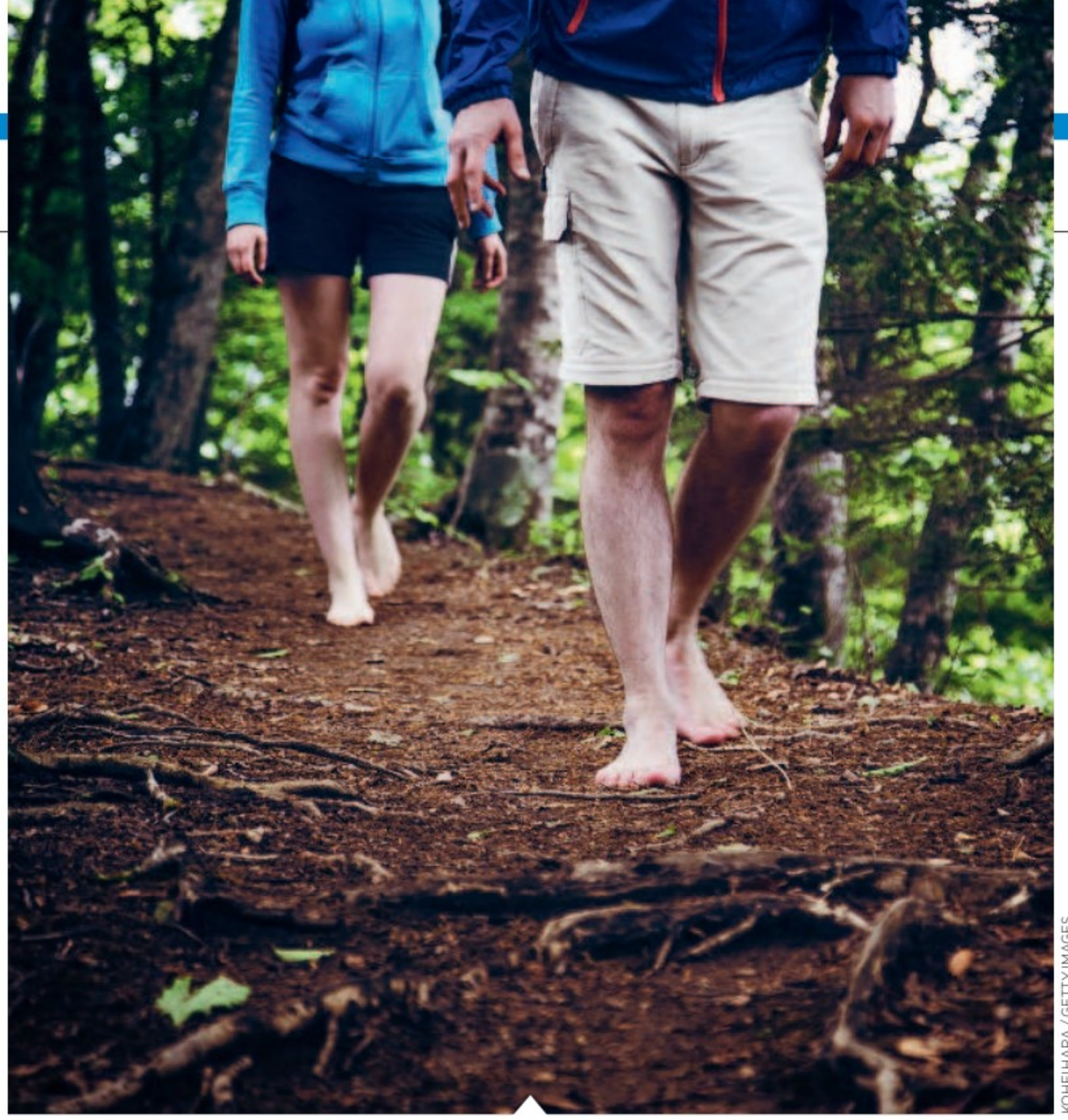
commune piétonnise une partie de son espace public, le chiffre d'affaires des commerces de proximité augmente, insiste Mathieu Chassignet. *De plus, un euro dépensé dans un commerce de proximité génère plus d'emplois qu'un euro dans un commerce de périphérie. Donc la marche à pied crée de l'emploi ! »*

Repenser nos espaces urbains et leur accessibilité

Si la part de nos trajets extérieurs réalisés à pied passait de 24 % à 30 %, comme c'était le cas à la fin des années 1980, l'Ademe estime le gain supplémentaire à 35 milliards d'euros par an. Pour cela, elle identifie deux leviers : rendre plus sûrs et agréables les déplacements pédestres avec des aménagements urbains adaptés, et créer des occasions de marcher en rapprochant les commerces et les services publics des habitations et des lieux de travail. *« Si on a plus de choses à faire dans un rayon de 1 à 1,5 km autour de soi, soit environ 15 minutes de marche, alors on se déplacera plus souvent à pied, sans même avoir à y penser »,* résume Mathieu Chassignet.

Il est fort probable que cela profiterait aussi à la santé mentale, à la réussite scolaire, au tourisme… ce que n'a pas chiffré l'étude. D'ailleurs, l'arrivée de nouvelles données plus précises et complètes, grâce aux GPS intégrés aux smartphones et montres connectées, et la prochaine enquête nationale « Emploi du temps » prévue en 2025-2026 par l'Insee (la dernière date de 2010) pourrait bien modifier ce bilan et apporter de nouvelles perspectives pour les politiques publiques. Et ainsi nous amener à repenser nos espaces urbains pour ceux dont l'autonomie de marche est la plus fragile, comme les seniors, les enfants et les personnes en situation de handicap. ■ **É. G.**

* Cordier Bruno, Adetec, 2024. Mobilité à pied et bilan socio-économique de la marche (163 p.).



KOHEI HARA / GETTY IMAGES

En favorisant l'appui sur l'avant-pied et un meilleur amortissement des chocs, la marche à pieds nus permet de retrouver une locomotion plus naturelle.

Une autre marche est possible

Les souliers modernes, en modifiant la mécanique naturelle des pas, feraient plus de mal que de bien à leurs porteurs. Mais de là à marcher pieds nus…

Pour bien marcher, il est nécessaire d'avoir de bonnes chaussures, ne cesse-t-on d'entendre. Mais, quelle est la part de vrai dans ce dogme ? Ce qui est considéré comme une « bonne chaussure » est-il véritablement bénéfique pour notre physiologie ? Ces dernières années, les preuves se sont accumulées pour démontrer qu'il n'en était rien et que les chaussures modernes, des sneakers aux godasses de randonnée, font plus de mal que de bien à leurs porteurs *. Et cet apparent paradoxe est on ne peut plus logique. Le groupe de primates dont découle l'espèce humaine est bipède depuis 7 millions d'années. Durant cette période, les hominidés ont couvert leurs pieds de dispositifs confectionnés à partir de végétaux ou de cuirs d'animaux. Des chaussants servant à protéger les pieds de la neige ou du froid, et à empêcher qu'ils ne s'écorchent trop durement sur les cailloux. Seulement, depuis un siècle et l'avènement du caoutchouc synthétique, la fonction des chaussures a changé du tout au tout. Elles n'ont plus comme unique tâche de protéger

le pied. Elles modifient notre façon de marcher, conduisant sur le long terme à des altérations de nos muscles, de nos nerfs et de nos articulations. *« La chaussure actuelle a perverti notre démarche, nous obligeant à attaquer du talon chacun de nos pas,* décrit Bernard Delalande, kinésithérapeute et auteur d'un article récent sur la nécessité de marcher autrement. *Or, c'est totalement contre-nature. Aucun mammifère terrestre n'attaque le sol autrement qu'avec ses doigts et l'avant de son pied. »*

Des millions de microchocs qui se propagent jusqu'au cerveau

Et nous ne devrions pas non plus. Notre démarche naturelle se fait également par un appui de l'avant-pied, les orteils servant d'amortisseurs. Le talon n'est pas censé encaisser le choc du pas. Et pourtant, c'est ce que nous sommes contraints de faire lorsque nous sommes chaussés. Avec leur rigidité, leur avant resserré, leur talon et leur semelle épaisse, les chaussures nous obligent à attaquer le sol du talon, générant à chaque pas un microtraumatisme (lire *Sciences et Avenir* n° 920), et favorisant une démarche qui contrevient à celle pour laquelle nous sommes conçus depuis des dizaines de milliers d'années.

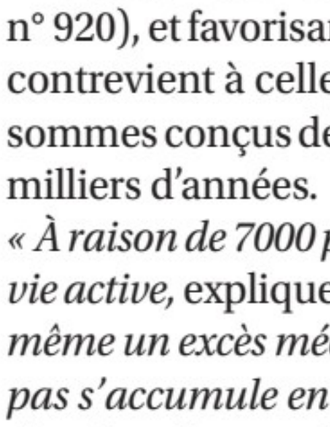
« À raison de 7000 pas par jour dans une vie active, explique Bernard Delalande, *même un excès mécanique modeste par pas s'accumule en dizaines de millions de microchocs qui se propageront dans la chaîne ascendante : cheville, genou, hanche et, au final, à force d'accumulation, jusqu'au cerveau. »* Et le spécialiste de rappeler qu'en France, 113 000 prothèses totales de genou et 165 000 prothèses de hanche sont posées annuellement ; et qu'au niveau européen, la lombalgie chronique est la première cause d'arrêt longue durée. *« Faire de la prévention en corrigeant le schéma de marche serait nettement moins coûteux et largement plus efficace qu'une arthroplastie… »*

La solution des « barefoot », des modèles très souples

Dans son cabinet de masseur-kinésithérapeute, Bernard Delalande a vu passer beaucoup de randonneurs. La plupart viennent pour des chutes, résultant bien souvent des chaussures qu'ils portent. *« Des modèles montants, lourds et rigides, soi-disant pour protéger des entorses, et avec lesquelles ils vont descendre un pierrier le talon en premier. Ce qui, non seulement, est très douloureux et traumatique pour le genou, mais également contre-productif puisque cela déstabilise les pierres, et garantit la chute… »*

Une fois ce constat posé, une interrogation affleure : comment mieux marcher ? Étant donné qu'arpenter les rues et les chemins pieds nus ou en chaussettes ne constitue pas une option viable, il reste la solution des chaussures « barefoot » (« pied nu » en anglais), ces modèles très souples pour redonner au corps sa posture naturelle. Mais au-delà, c'est toute une norme culturelle centenaire qu'il s'agirait de remettre en cause.

« Il y a évidemment une éducation à faire auprès du grand public, affirme Bernard Delalande, *mais également en direction des professionnels. Nous soignons ainsi pléthore de gens pour des entorses liées aux chaussures, mais jamais un lien ne sera tracé entre les deux. Alors que c'est notre poids, en retombant sur le talon, qui tord la cheville. Ce qui ne se produit pas lors d'une réception sur l'avant-pied, qui engage toute une chaîne d'amortissements. La marche et la course avec les chaussures actuelles luttent contre la gravité, comme si chaque pas s'accompagnait d'un freinage. Au contraire de la marche sur l'avant-pied, qui s'accompagne d'une avance progressive et naturelle du centre de gravité. C'est un modèle qui redécouvre la légèreté. Un jeu avec la gravité plutôt qu'une guerre contre elle. »* ■ **H. R.**


JULIA DELATTE

« La chaussure actuelle a perverti notre démarche, nous obligeant à attaquer du talon chacun de nos pas »

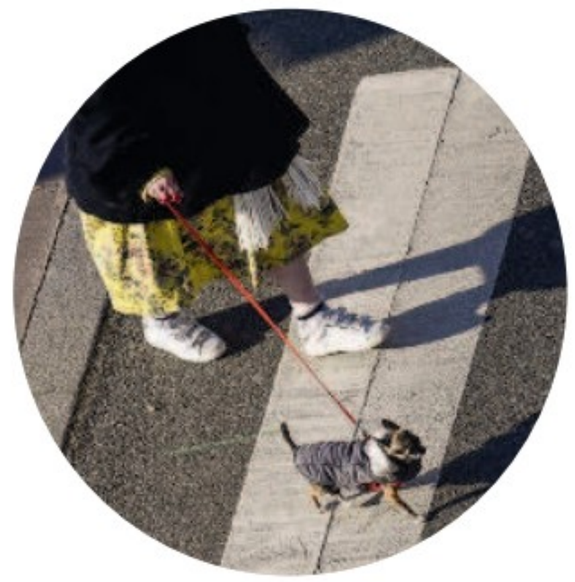
Bernard Delalande, masseur-kinésithérapeute à La Verpillière (Isère)

* Par exemple, une méta-étude dans *Gait & Posture* en 2015 recense tous les changements anatomiques et fonctionnels induits par les chaussures sur le long terme.

ACTIVITÉ PHYSIQUE

Le chien, gardien discret de l'espérance de vie

Meilleur ami de l'être humain, le chien se révèle aussi un allié solide pour rester en forme. Selon une étude menée au Royaume-Uni, les propriétaires de chien seraient quatre fois plus susceptibles d'atteindre les 150 minutes d'activité physique hebdomadaire recommandées. Et cet effet ne se limite pas aux promenades quotidiennes obligatoires : ces mêmes personnes déclarent plus volontiers pratiquer la marche comme activité de loisir à part entière. Les bénéfices se transmettent aussi aux enfants, puisque les jeunes qui grandissent avec un chien marchent davantage. Les chercheurs estiment que promener un chien régulièrement réduirait de 24 % le risque de mortalité toutes causes confondues, et de 65 % le risque de décès après un infarctus, en favorisant la rééducation cardiaque. T. B.


STEPHANE AUDRAS/REA

Cordes vocales
Une thérapie inédite pour retrouver sa voix

À l'hôpital de la Conception, à Marseille, une équipe d'ORL et de biologistes mène le premier essai au monde reposant sur une injection de cellules souches d'origine graisseuse réalisée directement au niveau des cordes vocales afin de leur permettre de retrouver leur souplesse originelle. Un espoir pour de nombreux patients handicapés par leur dysphonie. Reportage.

Par Sylvie Riou-Milliot

On y pense rarement et pourtant ce sont elles, nos cordes vocales, qui nous relient au monde. Bien présentes dans l'intimité de nos larynx et sans que nous en ayons conscience, elles ne cessent de se mobiliser. Des centaines de fois par seconde, ces deux structures à la fois fermes, souples et nacrées, s'accolent, se tendent, vibrent et ondulent. C'est sous l'effet de la pression exercée par l'air qui remonte par la trachée lors de l'expiration que leurs vibrations donnent à la voix son timbre et sa puissance. Mais ces cordes sont soumises à de nombreuses agressions : tabac, forçage vocal, pollution, infections, inflammations, etc. Et ne sont donc pas inusables. Surtout qu'elles peuvent aussi être atteintes par une anomalie congénitale ou, au cours de la vie, par un traumatisme (par exemple, après une intubation, une chirurgie de la thyroïde, une ablation de nodules). Autant de raisons à l'origine de dysfonctionnements possibles. Résultat : avec le temps, *« elles se rigidifient, ne vibrent plus normalement et perdent de leur souplesse,* explique le Dr Alexia Mattei, ORL à l'Assistance publique des Hôpitaux de Marseille (AP-HM). *Au final, la voix s'éraille, devient instable, fatigable et les répercussions professionnelles et personnelles peuvent être majeures. »*

Des replis d'environ 20 mm de long, situés dans le larynx

La rééducation orthophonique régulière avec un phoniatre prend alors toute sa place. Mais cela ne suffit pas toujours. D'où l'idée de venir aider directement ces cordes vocales fibrosées, dites cicatricielles, à retrouver leur souplesse originelle. Une nouvelle piste prometteuse consiste à y injecter des cellules issues de la graisse des patients. Objectif : reparler à nouveau, et même rechanter ! Cette approche innovante fait actuellement l'objet d'un essai de thérapie cellulaire à Marseille. Mené par les médecins Alexia Mattei et Mélanie Velier, du laboratoire de thérapie cellulaire de l'AP-HM, il s'agit du premier essai au monde reposant sur une injection de cellules souches d'origine adipeuse réalisée au niveau des cordes vocales *(voir l'infographie p. 69)*. Avec l'espoir de redonner souplesse et vigueur à ces replis d'environ 20 mm de long, situés dans le larynx, pour mieux les faire vibrer.

Mais quelles sont ces cellules salvatrices issues du propre corps du patient ? *« Elles sont contenues dans la graisse, en droite ligne des travaux menés sur les cellules souches, il y a maintenant*

GARO/PHANIE

Soumises à de nombreuses agressions au cours de la vie — tabac, pollution, infections, inflammations, forçage vocal —, les cordes vocales peuvent également être sujettes à des anomalies congénitales ou des traumatismes (ici un examen laryngoscopique).

une vingtaine d'années », détaille le Dr Maxime Abellan Lopez, chirurgien plastique à l'Hôpital de la Conception (Marseille), premier maillon de la chaîne et chargé du prélèvement de la graisse au bloc opératoire. Pour cette équipe, tout a commencé il y a environ dix ans, avec une approche validée par un essai baptisé « Cellcordes », mené sur huit personnes (dont une chanteuse professionnelle), toutes très invalidées par leur dysphonie (anomalie de la voix). Publiée en 2018 dans la revue *Jama,* l'étude a démontré que *« six mois après l'injection, l'état de six personnes s'était nettement amélioré, leur voix étant devenue plus nette et s'éraillant moins »,* précise Alexia Mattei. Un bénéfice évalué, d'une part, sur des critères subjectifs comme le calcul d'un score établi par un autoquestionnaire (VHI, Voice Handicap Index) explorant le ressenti des patients vis-à-vis de leur gêne vocale. Mais aussi par des critères objectifs, avec l'observation en direct des vibrations des cordes.

Une caméra pour visualiser en temps réel les vibrations

Cet examen, une vidéo-laryngo-stroboscopie, consiste à introduire par la narine une fine sonde, munie d'une caméra, jusqu'au larynx. Il permet de visualiser en temps réel, sur un écran, les vibrations des cordes au moment précis où le patient exécute les consignes de l'ORL, c'est-à-dire la prononciation des sons demandés : dire un « I », un « O » ou un « A »… Et c'est la comparaison entre les résultats des deux examens, le premier réalisé avant l'injection et le second six mois après, qui permet d'affirmer l'éventuelle amélioration des vibrations.
En parallèle de leurs travaux, les chercheurs marseillais se sont rapprochés de biologistes de l'hôpital de Graz, en Autriche, qui développaient de leur côté un modèle d'étude *in vitro* consistant à rendre des cellules fibreuses. Cette rencontre a permis à l'équipe marseillaise de tester sur les cultures cellulaires transalpines les effets de leur produit de thérapie cellulaire. *« Nous avons alors pu confirmer son efficacité antifibrotique, en démontrant la réduction significative des marqueurs de fibrose »,* pointe Mélanie Velier.
Cette coopération a permis la mise en place de Cellcordes 2, mené cette fois à une plus grande échelle. *« Il s'agit de 36 patients qui, par tirage au sort, reçoivent soit le traitement de thérapie cellulaire pour 18 d'entre eux, soit un placebo pour les 18 autres »,* détaille Alexia Mattei. C'est le cas ce matin. Nous sommes dans une salle du bloc opératoire avec Maxime Abellan Lopez et Mme G, 50 ans, la 17e personne à participer à cet essai. Cette quinquagénaire a perdu sa voix en 2022 lors d'une intubation réalisée en raison d'un choc infectieux sévère, ayant nécessité sa mise sous coma artificiel pendant 15 jours. Malgré différentes approches et une rééducation orthophonique intensive, trois ans après, sa voix est encore très faible et, surtout, extrêmement fatigable. C'est sur les conseils de son ORL qu'elle a accepté de participer à l'essai.

Fabrication d'un médicament cellulaire personnalisé

8 h 30. Mme G est installée et, après une anesthésie locale, le chirurgien a réalisé deux petites incisions sur chacun de ses flancs, des zones classiquement riches en graisse et facilement accessibles. Il y introduit successivement deux trocarts (tiges cylindriques creuses), chacun étant relié à une poche transparente qui aspire régulièrement la graisse, une substance jaunâtre un peu molle et très riche en cellules, les adipocytes. *« L'objectif est de récupérer 200 ml de tissu adipeux contenant différentes cellules dites mésenchymateuses, progéniteurs, péricytes (qui entourent les petits vaisseaux sanguins), globules*

CONSEILS

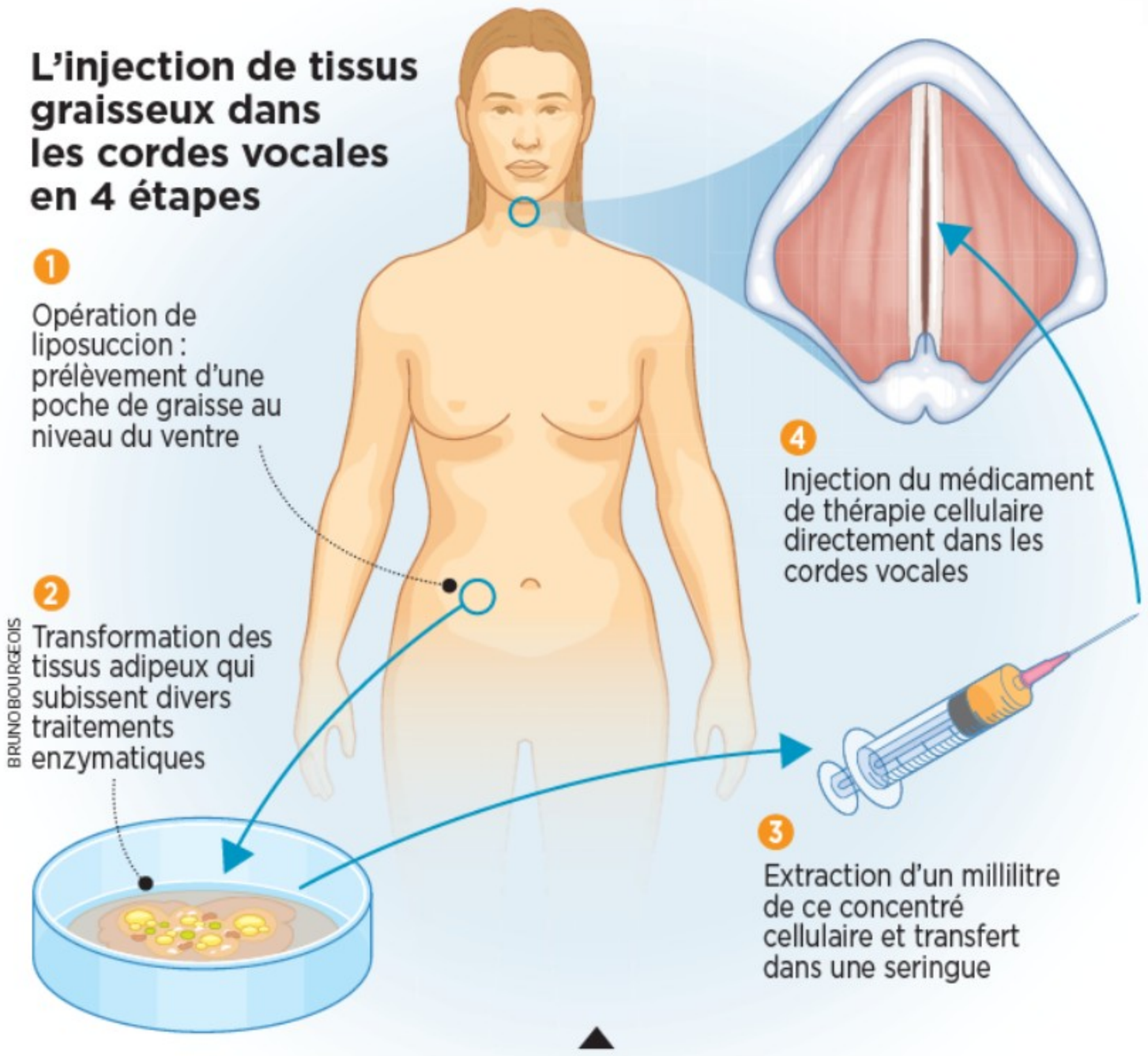
Prendre soin de son appareil vocal

Éviter de crier, de forcer, de parler fort est évidemment recommandé pour préserver sa voix, qu'elle constitue, ou pas, un outil professionnel (enseignants, chanteurs, comédiens, avocats, politiciens, etc.). En cas de fatigue vocale, il est aussi important de ne pas tenter de chuchoter, cet effort accentuant la fatigue. Bien hydrater ses cordes vocales (au moins 1 litre d'eau par jour) est toujours conseillé, tout comme éviter l'alcool et le tabac, facteur majeur d'irritation locale. Il faut savoir que certains médicaments (corticoïdes inhalés, antihistaminiques, neuroleptiques, décongestionnants nasaux…) peuvent être responsables d'une modification de la voix. Dans ce cas, ou face à un enrouement qui se prolonge au-delà de trois semaines, mieux vaut toujours consulter.

PROJET

Une imprimante 3D pour réparer les cordes

Déposer, au millimètre près, un hydrogel réparateur sur ces petits muscles vibratoires, grâce à une imprimante 3D miniature de la taille d'un spaghetti. Tel est le but des travaux d'une équipe canadienne de l'université McGill, à Montréal, récemment publiés dans *Cell Device.* Un bémol toutefois : seule la preuve de concept a été validée, le dispositif n'ayant encore été testé ni chez l'animal ni chez l'humain. Ici, la prouesse tient dans la miniaturisation du bras de l'imprimante, introduite dans le laryngoscope (dispositif médical d'examen) et pilotée par le chirurgien. Ce qui permet, par le biais d'une buse arquée et mobile inspirée de la trompe de l'éléphant, de déposer avec une précision inégalée un trait de 1,2 mm d'hydrogel. Reste encore à concevoir la nature de ce gel idéal, peut-être une collaboration à venir entre Marseille et Montréal.



5 millions de cellules environ seront contenues dans la seringue de 1 millilitre préparée pour le patient. L'injection peut être renouvelée après six mois en cas d'insuccès.

blancs, toutes possédant des capacités de régénération tissulaire », précise Mélanie Velier. Une fois le prélèvement terminé, la poche de graisse est transférée au laboratoire de culture et thérapie cellulaire (LCTC) situé dans le même hôpital, juste à quelques minutes de marche. Bientôt, les biologistes prennent le relais pour la transformer en un concentré cellulaire. Deux ingénieures en biologie, Chloé et Gaëlle, masquées, gantées et vêtues de leurs combinaisons stériles, se tiennent prêtes. Ce sont elles qui, d'ici à quelques heures, vont fabriquer le médicament personnalisé prévu pour Mme G.

« En pratique, le prélèvement de graisse va subir différents traitements, une étape de lavage, puis de digestion enzymatique des adipocytes avant celle de l'extraction, qui aboutira à un élixir cellulaire d'un petit volume de 1 millilitre, compatible avec une injection au niveau des cordes », explique Mélanie Velier. Qui poursuit : *« Nous croyons à la synergie des cellules entre elles et à leur effet dit "paracrine", c'est-à-dire celui dû aux différentes substances immunomodulatrices qu'elles secrètent. »*

Finalement, environ 5 millions de cellules seront contenues dans chacune des seringues de 1 millilitre. Au moins deux seringues sont préparées pour chaque patient. Car le design de l'étude a prévu une seconde chance en cas d'absence de résultat avéré lors du bilan effectué six mois après la première injection. Dans ce cas, si aucune amélioration de la voix et des vibrations n'est présente, une seconde injection peut être effectuée, le matériel ayant entretemps été conservé dans de l'azote liquide. Parallèlement, le laboratoire élabore aussi les seringues placebo, constituées, elles, de simple sérum physiologique et d'albumine.

Pour l'heure, le médicament de thérapie cellulaire de Mme G entre dans sa dernière étape de fabrication. Il est 14 h 15. Les ingénieures viennent tout juste de prévenir le Dr Julie Véran, responsable de la production au LCTC. La seringue prête à l'emploi a été déposée dans le sas et va être acheminée vers le box de consultation où Mme G attend, installée dans un fauteuil. Juste le temps d'une anesthésie locale et c'est désormais à Alexia Mattei de réaliser l'injection, sous contrôle de la vidéo-laryngo-stroboscopie. *« Dites "1", cela va rapprocher vos cordes »,* précise l'ORL, concentrée sur son geste, qui explique : *« L'idée est d'injecter les cordes tout particulièrement au niveau d'une zone appelée* lamina propria, *pour leur redonner toute leur souplesse. »*

Cure de silence obligatoire pendant trois jours

Quelques minutes plus tard, tout est fini. Il ne reste plus qu'à attendre, puis à revoir la patiente sous quelques jours. Dernière recommandation faite avant le retour de celle-ci, en fin de journée, à son domicile : une cure de silence pendant trois jours afin qu'elle ne force pas sur ses cordes. Que vient de recevoir Mme G ? Personne ne le sait. Personne… sauf Julie Véran, qui a effectué au dernier moment le tirage au sort. Mais ce n'est qu'à la fin du projet, comme dans tout essai clinique randomisé, et après l'analyse des résultats, que « l'aveugle » sera enfin levé.

Les chercheurs prévoient une analyse de leurs données d'ici à 2028. D'ici là, ils poursuivent d'autres axes de recherche, comme de *« parvenir à terme à identifier de potentiels marqueurs d'efficacité chez les bons répondeurs, pour pouvoir mieux sélectionner les patients »,* avance Mélanie Velier. Peut-être aussi de faire évoluer le protocole, de réfléchir à une éventuelle répétition des doses dans le temps. À ce jour, et avec désormais dix ans de recul, quatre patients sur les huit premiers n'ont pas eu besoin d'une nouvelle dose. *« Et moi, depuis que je reparle, je revis »,* conclut l'une d'entre elles, traitée il y a près de deux ans. ■

Les algues, des trésors nutritionnels à découvrir

Ces végétaux marins constituent un excellent apport en minéraux et en fibres, à condition de varier les espèces et les origines pour limiter l'exposition aux métaux lourds.

Wakamé, laitue de mer, nori… Malgré l'engouement pour la cuisine asiatique, les algues marines peinent encore à gagner nos assiettes, sinon en accompagnement des makis. Elles sont, le plus souvent, utilisées en agroalimentaire comme substances gélifiantes et épaississantes dans divers produits (glaces, crèmes dessert, sauces industrielles…). Pourtant, avec leur petit goût iodé, les **macroalgues** vertes telles que la laitue de mer, rouges comme la dulse, reconnaissable à ses extrémités palmées, ou brunes (wakamé, kombu) sont de véritables trésors nutritionnels.

70 000 tonnes
d'algues marines environ sont récoltées par an en France, premier pays récoltant de l'Union européenne.
(SOURCE: MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE)

Des pigments antioxydants

Toutes les algues marines contiennent de la **chlorophylle**, mais aussi d'autres pigments antioxydants, selon la profondeur à laquelle elles vivent : en surface pour les algues vertes, en eaux profondes pour les algues brunes et rouges, afin de capter au mieux les rayons lumineux qui leur parviennent. La fucoxanthine (Fx) est ainsi un caroténoïde présent uniquement dans les algues, en particulier brunes. D'autres caroténoïdes (bêta-carotène, zéaxanthine, violaxanthine, néoxanthine…) sont aussi des antioxydants majeurs présents dans les algues (1).

Les algues rouges et vertes contiennent, par ailleurs, des polyphénols dont des bromophénols, des acides phénoliques et des flavonoïdes. Ceux extraits de la dulse présenteraient *in vitro* une activité antioxydante supérieure à celle des vitamines C et E (2).

Mine de minéraux

Les algues constituent un excellent apport en minéraux puisés dans l'océan. La laitue de mer est la plus pourvue en fer (7 milligrammes pour 10 g d'algue séchée) et en calcium (113 mg/10 g, soit près de 10 % des besoins quotidiens) et fournit plus de la moitié des besoins

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

MACROALGUES Organismes vivants de grande taille (visibles à l'œil nu), le plus souvent aquatiques, capables de photosynthèse, par opposition aux microalgues, microscopiques.

CHLOROPHYLLE Pigment vert présent dans les chloroplastes des cellules végétales et des algues. Il assure l'absorption d'une partie de l'énergie des rayons solaires, ce qui rend possible la photosynthèse.

POLYSACCHARIDES SULFATÉS Macromolécules composées de longues chaînes de sucres portant des groupes sulfates. Ils sont connus pour leurs propriétés gélifiantes et épaississantes dans l'industrie agroalimentaire.

journaliers en magnésium (266 mg/10 g), qui intervient dans la gestion du stress, mais aussi la production d'énergie, la contraction et la relaxation musculaires. Avec 702 mg pour 10 g, la dulse apporte 20 % des besoins quotidiens en potassium. Les algues sont aussi de bonnes sources de sélénium (un antioxydant), de phosphore et de certaines vitamines comme la vitamine C (12 mg/10 g de haricots de mer), la vitamine E et la vitamine B9 (30 microgrammes/10 g de dulse) (3) indispensable à la synthèse de l'ADN et à la formation des globules rouges.

À limiter en cas de maladie

Certaines algues marines sont très concentrées en iode, particulièrement les brunes comme le kombu breton, une variété locale (46 mg/10 g de forme séchée), et le wakamé (3,6 mg/10 g). Nécessaire à la synthèse des hormones thyroïdiennes, l'iode participe au développement du fœtus pendant la grossesse. Un apport de 250 microgrammes par jour est ainsi recommandé chez les femmes enceintes (4). Mais les algues doivent être consommées avec parcimonie chez les personnes souffrant de troubles thyroïdiens. Celles-ci peuvent alors privilégier les algues vertes (laitue de mer) ou rouges (dulse, nori), qui en sont moins bien pourvues. La consommation d'algues est aussi à éviter chez les personnes qui suivent un traitement anticoagulant, en raison de leur teneur en vitamine K, et en cas d'hypertension artérielle à cause de leur apport en sel.

Riches en fibres

Les algues marines affichent 30 à 45 % de fibres, selon les variétés. Elles contiennent dans leurs parois cellulaires des **polysaccharides sulfatés** tels que l'ulvane présente dans les algues vertes, mais aussi l'alginate, le fucoïdane dans les algues brunes et le carraghénane dans les algues rouges (5). Ces polysaccharides ne sont ni digérés ni assimilés par les intestins, et agiraient comme des prébiotiques qui stimulent la croissance des bactéries intestinales bénéfiques ainsi que la production de produits de fermentation tels que les acides gras à chaîne courte (6). Enfin, malgré leur faible teneur en lipides, les macroalgues contiennent des acides gras polyinsaturés, tels les acides gras de type oméga-3 (7).

Bien les choisir

Les algues marines commercialisées sont principalement collectées sur les côtes bretonnes, dans des zones réglementées et contrôlées selon des normes bactériologiques très strictes. Il est préférable de les acheter certifiées bio, fraîches ou vendues sous vide, et de bien les rincer pour les dessaler deux ou trois fois si elles sont fraîches. Sous forme de paillettes, à mettre dans un assaisonnement ou une marinade, elles peuvent être consommées telles quelles ou être réhydratées à basse température pour en préserver tous les nutriments. Enfin, l'Agence nationale de sécurité sanitaire des aliments (Anses) recommande de varier les espèces et les origines pour limiter l'exposition aux métaux lourds (arsenic, plomb, mercure, cadmium) (8). ■ **Sylvie Boistard**

JOËL FLEURENCE professeur de biologie marine à l'université de Nantes (44)

Leurs protéines ne sont pas toutes digestibles

« Les algues rouges, comme le nori, apportent jusqu'à 47 % de protéines. Mais cette proportion varie selon la production d'un pigment protéique, la phycoérythrine, qui s'accumule dans l'algue à la fin de l'hiver pour diminuer fortement en été. Le problème est que les algues contiennent des facteurs antinutritionnels, essentiellement des polysaccharides, qui limitent la digestibilité des protéines. La consommation de l'algue japonaise ogonori *(Gracilaria verrucosa)*, également commercialisée en France, est toutefois un bon compromis car sa teneur plus modeste en fibres rend ses protéines plus digestibles. »

(1) Nutraceutical characteristics of the brown seaweed carotenoid fucoxanthin, Miyashita K. et al., *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2020.

(2) Assessment of the antibacterial and antioxidant activities of seaweed-derived extracts, Hejna M. et al., *Scientific Reports*, 2024.

(3) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(4) Iodine, Seaweed, and the Thyroid, Smyth P., *European Thyroid Journal*, 2021.

(5) Beneficial effects of seaweed-derived dietary fiber: Highlights of the sulfated polysaccharides, Huang W. et al., *Food Chemistry*, 2022.

(6) Chapter Four-seaweed and seaweed-derived metabolites as prebiotics, Charoensiddhi S. et al., *Advances in Food and Nutrition Research*, 2020.

(7) Anti-Obesity Effects of Macroalgae, Gómez-Zorita S. et al., *Nutrients*, 2020.

(8) Avis relatif à la teneur maximale en cadmium pour les algues destinées à l'alimentation humaine, Anses, 2020.

Des médicaments qui bloquent la douleur à la racine

Face aux limites des opioïdes, une nouvelle génération d'antalgiques émerge. Plutôt que d'agir sur le cerveau, elle cible les capteurs situés au bout des nerfs, qui sont les premiers à donner l'alerte en cas d'agression.

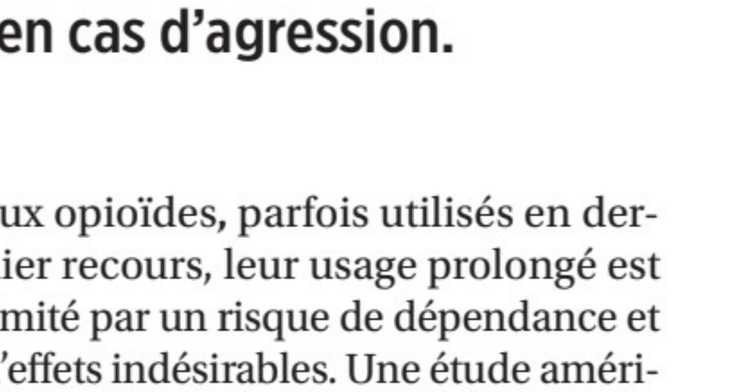
Un adulte sur trois est touché. Deux consultations sur trois lui sont consacrées. Et pourtant, face à elle, *« nous fonctionnons avec des médicaments de l'Antiquité »*. Elle, c'est la douleur. La formule volontairement provocatrice du Pr Serge Perrot, à la tête du Centre d'évaluation et de traitement de la douleur de l'hôpital Cochin, pointe une réalité : les traitements ont peu évolué ces vingt dernières années. Et ce, malgré un marché potentiel considérable pour l'industrie pharmaceutique. En pratique, les options restent donc limitées. Si pour les douleurs aiguës, notamment inflammatoires, les antalgiques classiques — paracétamol, anti-inflammatoires, opioïdes — sont relativement efficaces, la situation se complique pour les douleurs chroniques.

Les antalgiques habituels deviennent souvent inefficaces, en particulier dans les douleurs neuropathiques. Celles-ci surviennent lorsqu'un nerf, lésé par une pathologie (diabète, zona) ou un traumatisme, reste hypersensible : il continue de bombarder le cerveau de signaux de brûlure ou de décharge électrique, bien après la disparition de la cause initiale. Les médecins se tournent alors vers des médicaments initialement développés pour d'autres indications, comme certains antidépresseurs ou antiépileptiques.

Des options qui restent imparfaites : leur efficacité est modérée et ne concerne qu'environ un patient sur deux. Quant aux opioïdes, parfois utilisés en dernier recours, leur usage prolongé est limité par un risque de dépendance et d'effets indésirables. Une étude américaine, publiée en 2017 par les centres de contrôle et de prévention des maladies (CDC), montre qu'après une première prise de quelques jours, 6 % des patients sont encore sous opioïdes un an après. Un taux qui grimpe à 30 % lorsque l'exposition initiale se prolonge.

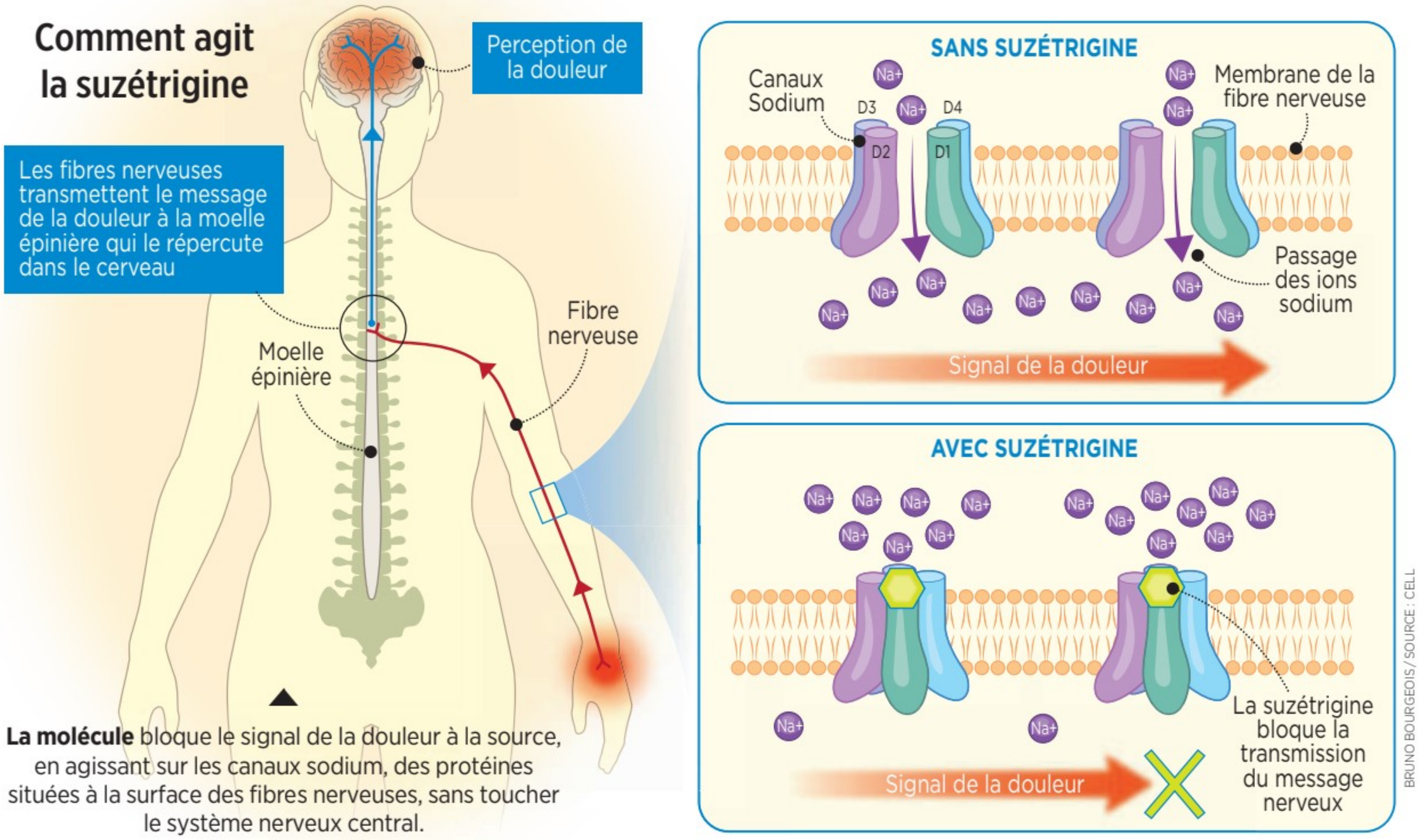
PRESCRIPTION

Tramadol : attention à son potentiel addictif



AFP

Présenté comme un opioïde « modéré », le tramadol voit aujourd'hui sa place remise en question. Une méta-analyse, publiée en octobre 2025 dans *BMJ Evidence-Based Medicine,* pointe un rapport bénéfices-risques incertain, des effets indésirables fréquents et des difficultés de sevrage. En France, les autorités sanitaires ont durci son encadrement et, depuis 2025, la prescription est faite sur ordonnance sécurisée pour une durée limitée. Elles ont aussi imposé des boîtes plus petites, afin d'éviter les traitements prolongés. Autant de signaux qui s'accumulent et de limites identifiées : malgré son usage courant, il ne suffit pas face à la douleur chronique, d'où l'urgence de trouver de nouvelles options.



Des chiffres d'autant plus préoccupants que ces médicaments restent très largement prescrits.

Autant dire que l'arrivée sur le marché américain, en 2025, d'un médicament appartenant à une toute nouvelle classe n'est pas passée inaperçue. *« La suzétrigine est la première découverte intéressante depuis vingt-cinq ans »*, témoigne la Pr Gisèle Pickering, médecin pharmacologue et directrice du Centre d'investigation clinique du CHU de Clermont-Ferrand. Premier médicament approuvé dans une nouvelle classe d'analgésiques non opioïdes, *« elle illustre l'évolution de la recherche vers des cibles "périphériques"»*, estime Dan Berlau, auteur d'une étude publiée en décembre 2024 dans *Pain Management,* qui fait le point sur les stratégies non opioïdes émergentes pour traiter la douleur. Plutôt que d'agir sur le cerveau (le système central) comme le font les opioïdes, *« on cible directement les nocicepteurs »*. Ces capteurs, situés à l'extrémité des nerfs, sont les premiers à donner l'alerte en cas d'agression. En bloquant le signal à la source, on évite d'affecter le système nerveux central, en limitant ainsi les risques de somnolence et de dépendance.

Des non-opioïdes visant spécifiquement chaque douleur

Concrètement, la suzétrigine agit en amont du signal douloureux. Elle cible une protéine située à la surface des nerfs, qui fait office de « porte d'entrée » pour le courant électrique. En verrouillant ce passage (un canal sodium nommé Nav1.8), la molécule bloque la transmission du message nerveux avant même qu'il ne quitte la zone douloureuse. Dans deux essais de phase 3 publiés en 2023 dans le *New England Journal of Medicine,* la suzétrigine a réduit significativement la douleur postopératoire pendant 48 heures par rapport au placebo. Elle n'a, en revanche, pas montré de supériorité face à un opioïde de référence. Les effets indésirables étaient le plus souvent légers à modérés. Le risque de dépendance n'a toutefois pas pu être évalué dans ces essais de courte durée. Et son efficacité n'a, pour l'instant, été démontrée que dans la douleur aiguë. La suzétrigine n'est donc pas l'analgésique miracle mais *« ouvre énormément d'horizons »*, s'enthousiasme Gisèle Pickering. *« Cela marque sans doute un tournant »*, ajoute Dan Berlau. En pharmacologie, les premières molécules d'une nouvelle classe sont souvent imparfaites, mais préparent le terrain pour les suivantes. La suzétrigine n'est, en effet, que la partie visible d'un mouvement plus large. D'autres pistes émergent, portées par une compréhension plus pointue des mécanismes de la douleur. La plus avancée repose sur d'autres canaux sodiques, qui agissent eux aussi comme des interrupteurs électriques à différents niveaux du circuit nerveux. Mais si ces cibles sont identifiées depuis plus de cent ans, la véritable innovation réside dans la finesse de l'approche. Jusqu'ici, les chercheurs se heurtaient à une impasse : les molécules ne parvenaient pas à bloquer

la douleur sans perturber d'autres fonctions vitales. La suzétrigine, elle, change la donne en réussissant enfin à cibler exclusivement le bon « interrupteur ». D'autres pistes visent non plus le signal lui-même, mais sa sensibilisation. C'est le rôle des traitements anti-NGF, qui bloquent une protéine capable de « monter le son » de la douleur en rendant les nerfs hyperréactifs. Une autre voie consiste à tenter de neutraliser les capteurs de chaleur ou d'acidité, afin de stopper le message à sa source. L'objectif n'est pas de nous rendre insensibles, mais de calmer ces sentinelles devenues hypersensibles. Enfin, une voie plus lointaine cherche à agir encore plus tôt. *« L'idée est de bloquer les mécanismes inflammatoires à la racine »,* souligne Gisèle Pickering. Au lieu de traiter le nerf lui-même, on cherche ici à neutraliser l'environnement agressif qui l'entoure et déclenche la douleur.

La recherche est donc en pleine ébullition. Le modèle de l'antalgique qui traite toutes les douleurs est abandonné. Les non-opioïdes à venir visent des mécanismes spécifiques, propres à chaque type de douleur. Une douleur inflammatoire après une entorse, une douleur neuropathique liée à un nerf lésé, ou encore certaines douleurs chroniques diffuses ne relèvent pas des mêmes mécanismes. Elles ne peuvent donc pas requérir les mêmes traitements. De plus, il est maintenant clair qu'*« une des principales raisons des échecs cliniques répétés réside dans la dépendance excessive aux modèles animaux, qui ne reflètent pas fidèlement la biologie des nocicepteurs humains »*, écrivent les auteurs dans *JCI* en juin 2025.

PHOTOPQR/LA MONTAGNE/BOILEAU FRANCK/MAXPPP

« La suzétrigine est la première découverte intéressante depuis vingt-cinq ans »

Gisèle Pickering, médecin pharmacologue et directrice du Centre d'investigation clinique du CHU de Clermont-Ferrand

S'appuyer sur des neurones sensoriels humains

Une évolution déjà engagée : des équipes, comme celle d'Emmanuel Bourinet, spécialiste des canaux ioniques et directeur de recherche au CNRS, s'appuient désormais sur des neurones sensoriels humains pour étudier la douleur, afin de mieux coller à la réalité biologique et de limiter les échecs en clinique.

Ce renouveau marque un tournant, après des années de désert industriel. *« De nombreux laboratoires s'étaient désengagés de la douleur, car ils y ont perdu beaucoup d'argent »*, rappelle le médecin spécialiste de la douleur Serge Perrot, mais le vent a tourné. Début 2026, à Boston (États-Unis), un sommet entier était consacré aux traitements non opioïdes — une première. Sur scène, les poids lourds du secteur, de Vertex à Eli Lilly, étaient venus présenter des molécules en développement. Surtout, il n'était plus seulement question de promesses, mais de données cliniques, de protocoles d'essais, de biomarqueurs. Autrement dit, d'un champ en train de passer de la théorie à la pratique. ■

Cécile Coumau

BIOTECHNOLOGIE

Une piste française prometteuse

Moduler le signal douloureux pour réduire son intensité. C'est la piste qu'Aziz Moqrich a empruntée, il y a dix-neuf ans, lorsqu'il a découvert la protéine TAFA4. Si le neuroscientifique a très vite parié sur cette protéine, c'est parce qu'elle est naturellement produite par l'organisme, ce qui pourrait favoriser une bonne tolérance, mais aussi parce que son mécanisme d'action est original. *« Concrètement, elle va arrêter l'excitabilité des fibres lésées et calmer le métabolisme »,* indique-t-il. C'est-à-dire l'activité biologique excessive autour de ces fibres, notamment les mécanismes impliqués dans l'inflammation.

TAFA4 agit en périphérie, *« elle ne passe pas la barrière hématoencéphalique »,* précise le chercheur, lauréat du prix Axel Kahn 2025. C'est une caractéristique primordiale car elle limite les effets au niveau du système nerveux central. Contrairement aux opioïdes, cette approche n'active pas les circuits cérébraux impliqués dans la dépendance.

En agissant à ce niveau, elle pourrait aussi limiter l'installation d'une douleur chronique, en intervenant en amont des mécanismes de sensibilisation.

Les études précliniques chez l'animal ont montré que TAFA4 était effectivement capable de prévenir l'apparition de douleurs chroniques post-chirurgicales.

Cette piste, développée par la biotech française Tafalgie, cofondée par Aziz Moqrich, entre en phase clinique, avec une mise sur le marché envisagée à l'horizon 2030.

DAMIEN MEYER / AFP

La contamination des sols et des eaux au cadmium est due notamment aux activités agricoles, au travers de l'épandage de fertilisants (boues de stations d'épuration, fumier…), en particulier les engrais phosphatés.

Le cadmium, un polluant de plus dans nos assiettes

Présent dans la cigarette ou les fertilisants agricoles et rejeté dans la nature par certaines industries, ce métal lourd est pointé du doigt pour sa toxicité. Il fait l'objet d'alertes répétées de la part des autorités sanitaires. Explications.

Du cadmium dans les crustacés et les mollusques, le chocolat et les légumes feuilles (épinards, salade, etc.), mais aussi dans certains aliments du quotidien comme le pain, les pâtes et les pommes de terre. La troisième grande étude de l'alimentation totale française (EAT3), publiée en février et, en mars, la nouvelle expertise sur l'exposition des Français au cadmium, toutes deux conduites par l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses), sont sans appel : notre alimentation est largement contaminée par le cadmium et constitue même — et de loin ! — la source majeure de contamination de la population française non fumeuse.

Ce métal lourd est présent à l'état naturel dans les sols, et tout particulièrement dans ceux se situant sur des roches calcaires, comme en Champagne, en Charente ou dans le Jura. S'y ajoute une contamination liée aux activités agricoles, au travers de l'épandage de fertilisants (boues de stations d'épuration, fumier…), dont l'utilisation d'engrais phosphatés. *« Le phosphore est, avec l'azote, le soufre et le potassium, un élément nutritif majeur des plantes pour lequel une fertilisation est souvent nécessaire, les engrais phosphatés étant généralement fabriqués à partir de phosphates de calcium »*, explique Jean-Yves

Cornu, chargé de recherche à l'Inrae de Bordeaux. Le problème est qu'en France, cet engrais provient majoritairement de roches phosphatées du Maroc et de Tunisie, des gisements naturellement riches en cadmium.

L'imprégnation des adultes a quasiment doublé en dix ans

Le métal imprègne ainsi les sols, les eaux superficielles et souterraines, et entre dans la chaîne alimentaire, capté par les végétaux où *« il monte jusqu'aux feuilles, aux fruits ou aux grains en empruntant les mêmes transporteurs physiologiques que d'autres éléments nutritifs tels que le zinc, le manganèse et le fer »*, précise Jean-Yves Cornu. Pour finir dans nos assiettes. Même si son absorption gastro-intestinale est faible (de 5 % pour les hommes à 10 % pour les femmes), *« la majeure partie reste dans l'organisme et s'y accumule progressivement et durablement, principalement dans les reins et le foie qui mettent des dizaines d'années à l'éliminer »*, explique le cardiologue Pierre Souvet, président fondateur de l'Association santé environnement France (Asef). Pas étonnant, dès lors, que la population française soit, elle aussi, largement contaminée au cadmium. Son imprégnation a même quasiment doublé chez les adultes en dix ans, entre les deux grandes études nationales conduites par Santé publique France (Étude nationale nutrition santé — ENNS — en 2006-2007 et étude Esteban 2014-2016).

Si bien qu'aujourd'hui, *« 47,63 % de la population de 18 à 60 ans dépassent le seuil de concentration critique au-delà duquel peuvent apparaître des effets toxiques sur la santé, seuil fixé par l'Anses à 0,5 microgramme de cadmium par gramme de créatinine dans les urines »*, note Sébastien Denys, ingénieur agronome et directeur santé-environnement-travail de Santé publique France. Les femmes semblent plus touchées que les hommes, sans que cette différence ne soit encore clairement expliquée. *« Il semble qu'une alimentation plus pauvre en protéines, en calcium, en fer, en cuivre ou en zinc facilite l'absorption digestive du cadmium, alors qu'au contraire, les régimes alimentaires riches en fibres la diminuent. Or, les femmes ont davantage tendance à être carencées en fer, ce qui pourrait expliquer cette différence hommes-femmes »*, avance Pierre Souvet.

Le cerveau est très vulnérable aux toxiques environnementaux

Mais ce qui inquiète encore davantage, ce sont les niveaux d'exposition observés chez les enfants. Publiée en 2021, l'étude Esteban, qui livre les premières données d'imprégnation au cadmium chez les 6-17 ans, le montre clairement : 18,14 % des jeunes dépassent le seuil de 0,5 microgramme (µg) de cadmium par gramme de créatinine. Plus récemment, EAT3 montre, pour 23 à 27 % des enfants de 3 à 17 ans, un dépassement de la dose journalière tolérable, fixée à 0,35 µg par kilo de poids corporel et par jour. *« Chez les enfants, c'est vraiment la consommation de céréales du petit-déjeuner qui pose problème. Ceux qui en mangent près de 20 g par jour ont une imprégnation au cadmium majorée de 8,63 % par rapport à ceux qui en mangent très peu, 4 g par jour »*, observe Sébastien Denys. Lancée en 2025 avec l'Anses, l'enquête Albane permettra de

ALIMENTATION

3 conseils pour limiter son exposition

1 Varier les sources de produits céréaliers en alternant le blé avec le sarrasin, l'orge, l'avoine… et, chez les enfants, limiter les céréales transformées du petit déjeuner.

2 Cuisiner davantage de légumes secs (lentilles, haricots blancs…), moins accumulateurs de cadmium, au lieu d'aliments à base de blé, comme les pâtes.

3 Lutter contre les carences en fer et en zinc, afin de limiter l'absorption intestinale, et donc la toxicité du cadmium dans l'organisme.

(SOURCE : CN-URPS ML, ASEF, ANSES)

UMR ISPA, INRAE

VERBATIM

JEAN-YVES CORNU

CHARGÉ DE RECHERCHE À L'INRAE DE BORDEAUX

« Mieux sélectionner les variétés de céréales »

“Pour limiter l'exposition de la population au cadmium, la voie la plus prometteuse reste la sélection de variétés de céréales faiblement accumulatrices de ce métal, et leur utilisation sur les sols contaminés en cadmium. Pour le blé dur, elles permettent en effet de réduire jusqu'à trois fois la teneur en cadmium des grains sans en affecter le rendement. Reste à généraliser cette approche à d'autres cultures, parmi les plus contribuantes à l'exposition alimentaire au cadmium, notamment le blé tendre. Un autre levier d'action serait de limiter encore l'apport de phosphore minéral au sol, en sélectionnant, par exemple, des variétés peu exigeantes en phosphore ou capables de mobiliser efficacement celui déjà présent dans les sols.”

Le top 10 des aliments les plus contaminés

Teneur moyenne en cadmium (en microgrammes par kilo de poids frais)

81
Crustacés et mollusques

58
Confiseries et chocolat

51
Abats

34
Chips et biscuits salés

30
Condiments, herbes et épices

29
Pommes de terre

28
Céréales du petit déjeuner

20 à 22
Pain

20
Noix et fruits oléagineux

15
Légumes

SOURCE : ÉTUDE DE L'ALIMENTATION TOTALE FRANÇAISE 3 (EAT 3), FÉVRIER 2026

SHUTTERSTOCK

suivre encore plus précisément l'évolution de l'exposition de la population française (y compris les enfants à partir de 3 ans) sur plusieurs années. Premiers résultats attendus en 2028.

Car le cadmium a des incidences sur notre santé. *« Il augmente le risque d'ostéoporose et de fractures osseuses, entraîne des atteintes du foie et des reins pouvant évoluer en insuffisance rénale et favorise la probabilité d'une pathologie cardiovasculaire »*, précise Pierre Souvet. Le cadmium apparaît aussi aujourd'hui comme un *« neurotoxique émergent préoccupant. Ce métal altère l'intégrité de la barrière hémato-encéphalique, ce qui facilite sa pénétration dans le tissu nerveux »*, note le Dr Emmeline Lagrange, neurologue au CHU de Grenoble Alpes et spécialiste des interactions entre environnement et neurologie. Or, le cerveau est un organe très vulnérable aux toxiques environnementaux. *« Toute atteinte chronique, même à faibles doses, peut avoir des conséquences neurologiques ou neuropsychiatriques »*, poursuit-elle. Mais c'est surtout la vulnérabilité du cerveau en développement qui inquiète les spécialistes. *« Le cadmium traverse le placenta et peut s'accumuler dans l'organisme du fœtus à des niveaux très supérieurs à ceux du sang maternel, parfois jusqu'à 70 fois plus élevés »*, souligne la neurologue.

Le cadmium favoriserait l'apparition de cancers

Classé cancérigène « certain » pour le poumon par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ), le cadmium est également suspecté de favoriser l'apparition de tumeurs cancéreuses du sein, des reins et du pancréas. Dans la revue *Cell Biology and Toxicology,* l'équipe de Mathieu Gautier, professeur à l'université de Picardie Jules-Verne, avec les universités de Dunkerque, de Lille et de Reims Champagne-Ardennes, a ainsi observé que des modèles de cellules humaines pancréatiques saines acquièrent des propriétés cancéreuses après une exposition chronique de 7 mois au cadmium. Et chez un modèle de souris possédant la mutation majoritaire retrouvée dans les cancers du pancréas, l'injection de cadmium aggrave la fibrose associée aux lésions précancéreuses. *« Il existe des études épidémiologiques montrant une association entre l'exposition au cadmium et le risque de cancer du pancréas. Mais, à ce jour, aucun lien de cause à effet n'est clairement établi »,* tempère Mathieu Gautier.

Pour les médecins libéraux et les autorités sanitaires, il est donc urgent d'agir. Depuis 2019, l'Anses préconise d'intervenir à la source en abaissant les valeurs limites de cadmium dans les matières fertilisantes, tout particulièrement les engrais phosphatés, afin de freiner l'accumulation du métal dans les sols agricoles. La Commission européenne a d'ores et déjà durci sa réglementation en fixant, depuis 2025, à 40 milligrammes (mg) par kilo la teneur limite en cadmium des engrais phosphatés, et à 20 mg/kg d'ici à 2035. *« Or, en France, aucun arrêté ministériel n'a encore été publié »*, s'étonne Pierre Souvet. Le seuil appliqué est toujours de 90 mg/kg, quand la Finlande, la Slovaquie ou la Hongrie appliquent déjà le seuil de 20 mg/kg. ■

Sylvie Boistard

INTERFOTO / SAMMLUNG RAUCH / AURIMAGES

Les femmes sont peu visibles dans les représentations de banquets médiévaux, sauf exception, comme ici lors d'un mariage princier scellant une alliance, au cœur d'un espace politique dominé par les hommes (« Roman de Renaud de Montauban », XIIIe siècle).

Alimentation

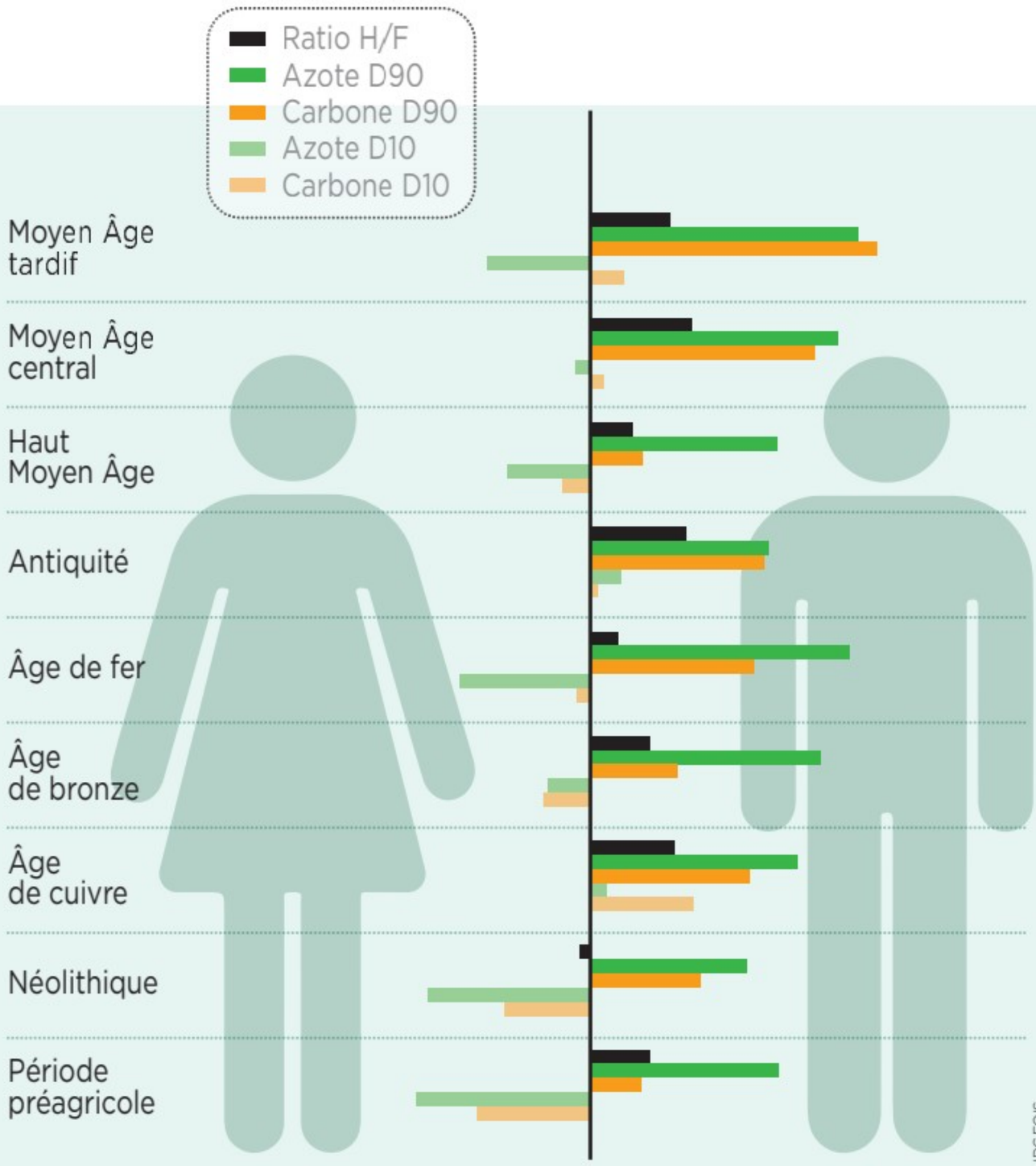
Les différences hommes-femmes révélées

Depuis des millénaires, les inégalités entre les hommes et les femmes se sont creusées y compris sur le plan alimentaire. Une vaste étude portant sur plus de 12 000 squelettes suggère ainsi qu'en Europe, du néolithique au Moyen Âge, les hommes ont eu un accès bien plus important aux protéines animales que les femmes.

Par Marine Benoît

C'est la première fois que des statistiques le démontrent. Depuis des millénaires, les inégalités entre les sexes ne résident pas seulement dans le partage du pouvoir, du travail ou des richesses, mais se jouent aussi dans l'assiette. Publiée fin avril dans la revue *Pnas Nexus* par une équipe internationale de chercheuses et chercheurs (Inrap et CNRS en France, Université Simon Fraser au Canada), une vaste étude suggère en effet qu'en Europe, les hommes ont eu un accès bien plus important aux protéines animales que les femmes et ce, depuis le néolithique au moins. *« Des travaux démontrent depuis longtemps que les inégalités sociales se répercutent sur la santé »,* affirme Rozenn Colleter, archéoanthropologue à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) et première auteure de l'étude. *« Parce que mon quotidien est de travailler avec des squelettes, je me suis demandé de quelle manière les os pouvaient encore traduire ces inégalités. Les isotopes se sont avérés être une excellente source de données continues. »*

Et des données, Rozenn Colleter et Klervia Jaouen, spécialiste en géochimie isotopique, en ont trouvé beaucoup : pas moins de 12 281 squelettes adultes issus de 393 sites archéologiques d'Europe et du bassin méditerranéen, datés du néolithique au Moyen Âge tardif, ont fait l'objet de leur analyse. En ligne de mire : les isotopes stables de l'azote et du carbone présents dans le collagène osseux, qui permettent de reconstituer une partie du régime alimen-



Plus une barre est décalée vers la droite, plus les hommes sont surreprésentés dans le groupe considéré.

BRUNO BOURGEOIS

PROTÉINES ANIMALES

Pour chaque période, une surreprésentation

Cette infographie compare, pour chaque période, la répartition hommes-femmes et leurs niveaux de consommation de protéines animales estimés par les isotopes. En noir, le ratio des sexes dans l'échantillon (plus la barre côté hommes est longue, plus les hommes sont nombreux). En couleur, un indice de surreprésentation pour la consommation de carbone et d'azote selon le sexe. En orange opaque, les déciles supérieurs (D90) de l'indice de carbone, et en orange translucide les déciles inférieurs (D10). En vert, les mêmes déciles pour l'indice d'azote, indicateur direct de la consommation de protéines animales (opaque = D90, translucide = D10). On observe que les hommes sont majoritaires dans toutes les périodes. Surtout, ils sont plus souvent dans les déciles supérieurs (D90), donc les plus gros consommateurs de protéines animales, tandis que les femmes se retrouvent davantage dans les déciles inférieurs (D10), correspondant aux plus faibles consommations.

taire des individus. *« Pour faire simple, plus la proportion d'azote dans les os d'une personne est élevée, plus sa consommation de protéines animales — viande, poisson, produits laitiers — a été importante au cours de sa vie »*, explique l'archéoanthropologue. Même principe pour le carbone, qui, lui, est révélateur de la consommation de végétaux.

Un problème restait néanmoins à régler, avant de tirer des conclusions de ces milliers de compositions isotopiques. *« On ne peut pas comparer des données d'un site à l'autre, d'une période à l'autre »,* avertit Rozenn Colleter. En effet, de nombreux facteurs comme le climat, les pratiques agricoles ou encore la nature des sols modifient la signature isotopique locale. *« Par exemple, le fumage ou le stress métabolique peuvent influencer les compositions isotopiques et, par conséquent, les références locales pour une période donnée. »* Il a, en outre, été démontré que la grossesse réduisait la signature isotopique en azote des femmes alors même qu'elles ne changeaient pas leur alimentation. Dès lors, les femmes enceintes peuvent apparaître, à tort, comme consommant moins de viande. *« En somme, il y a un bruit de fond qui empêche de mettre toutes les données sur le même plan. »*

L'interdécile, outil d'évaluation emprunté à l'économie

Pour contourner cette difficulté, l'équipe a emprunté un outil aux économistes : le rapport interdécile. Concrètement, les chercheurs ont comparé, dans chaque population, les 10 % d'individus ayant les valeurs isotopiques les plus élevées — tant pour l'azote que pour le carbone — aux 10 % les plus faibles. De quoi mesurer les écarts alimentaires à l'intérieur d'un groupe, et permettre de comparer ces écarts entre des sites très différents. *« C'est un indice très utilisé en économie pour mesurer les inégalités, mais qui peut tout à fait fonctionner en archéologie »,* pointe la chercheuse. Une fois ces extrêmes identifiés, l'équipe a regardé qui les composait… et a été surprise de constater que pour la très grande majorité des périodes, les hommes étaient surreprésentés parmi ceux qui consomment le plus de protéines animales, tandis que les femmes dominaient presque systématiquement le groupe inverse *(voir l'infographie ci-dessus).*

« On ne s'attendait pas à ce que cette répartition par sexe soit aussi marquée, ancienne, et systématique d'un point de vue chronologique », confesse Rozenn Colleter. Le constat est marquant pour le néolithique, période qui voit appa-

AURE PECQUEUR/INRAP

À Saint-Doulchard (Cher), une sépulture collective datant du néolithique récent a fourni des données à l'équipe de Rozenn Colleter.

raître l'agriculture et l'élevage en Europe. Contrairement à l'image d'un âge déjà fortement hiérarchisé, les sociétés néolithiques apparaissent comme les plus égalitaires de toute la série étudiée, de sorte que les écarts alimentaires entre les plus favorisés et les moins favorisés y sont faibles. Mais cette relative égalité s'arrête aux frontières du sexe. Chez les individus ayant les signatures isotopiques les plus riches en protéines animales (qui ne sont donc pas beaucoup plus élevées que les plus faibles), les hommes sont largement majoritaires. À l'âge du fer notamment, les hommes représentent 70 à 80 % du décile supérieur. Plus globalement, les hommes ont entre 1,5 et 3 fois plus de chances d'appartenir au groupe consommant le plus de protéines animales, selon les périodes. À l'inverse, les femmes dominent dans les déciles les plus faibles, puisqu'elles représentent 60 % et 75 % des individus ayant les régimes les plus pauvres en protéines animales. *« Cela montre que même dans des sociétés globalement égalitaires, il existait déjà des différences entre les sexes »,* souligne Rozenn Colleter.

Les inégalités alimentaires reflètent les hiérarchies sociales

À partir de l'âge du bronze, vers 2200 avant notre ère, les inégalités s'accentuent nettement : les écarts alimentaires augmentent en même temps que se développent les premières grandes hiérarchies sociales, la militarisation des sociétés et les prémices des États. Mais ce sont durant l'âge du fer, l'Antiquité et la fin du Moyen Âge que ces différences culminent. Dès lors, dans certaines populations, les 10 % d'individus les plus favorisés consomment jusqu'à deux fois plus de protéines animales que les 10 % les moins favorisés ! *« L'Antiquité constitue toutefois un cas particulier »,* précise l'archéoanthropologue. Les inégalités entre hommes et femmes y sont un peu moins marquées, même si les écarts entre classes sociales, eux, deviennent

ARCHÉOLOGIE

La taille des maisons, indice de richesse

L'idée de mesurer les inégalités alimentaires avec un indice statistique provient d'un autre domaine de l'archéologie. Rozenn Colleter s'est inspirée des travaux de l'archéologue américain Timothy Kohler, qui étudie depuis plusieurs années les écarts de richesse à partir… de la taille des maisons. Son raisonnement est simple : dans une même société, de fortes différences entre les habitations traduisent souvent de fortes inégalités économiques. En comparant des milliers de maisons d'Europe, des Amériques ou d'Asie, là encore sur 10 000 ans, Timothy Kohler a montré que les inégalités étaient d'abord faibles, puis augmentaient avec la complexification des sociétés, tout particulièrement en Europe et, enfin, diminuaient parfois. *« Nous avons repris sa méthode,* explique Rozenn Colleter. *Lui comparait les maisons ; nous, nous avons comparé les isotopes des os. »* Avec un même objectif : convertir des indices archéologiques disparates en outils capables de mesurer les inégalités à travers le temps.

GÉOCHIMIE

Mystère au couvent des Jacobins de Rennes

Si la majorité des sites étudiés montrent que les hommes ont davantage accès aux protéines animales, environ 5 % des sites recensés dans l'étude présentent la situation inverse : les femmes y apparaissent parmi les individus ayant les signatures isotopiques les plus riches. Le cas le plus frappant est celui du couvent des Jacobins de Rennes, qui abrita dès le XIVe siècle une communauté de religieuses. *« Les centaines de squelettes retrouvés révèlent que les femmes consommaient plus de protéines animales que les hommes présents sur le site »,* rapporte Rozenn Colleter. Un résultat qui s'explique par la nature de la population étudiée. *« Dans un couvent, on a une population hyper sélectionnée et, dans le cas des Jacobins, aisée. Ce ne sont pas des femmes représentatives de l'ensemble de la société. »*

DAMIEN MEYER / AFP

L'archéologue Rozenn Colleter devant un des squelettes mis au jour sur le site des fouilles en 2013.

plus forts. *« En bref, il y a moins de différence entre les sexes, mais davantage entre riches et pauvres à la période antique »,* résume la chercheuse. Au Moyen Âge, les écarts entre les sexes repartent à la hausse. Et là encore, les hommes restent plus nombreux dans les catégories les mieux nourries.

Pour quelles raisons ce fossé entre les hommes et les femmes perdure-t-il depuis les prémices de l'histoire ? La biologie ne suffit pas : aucune étude nutritionnelle n'ayant jamais montré que les femmes ont intrinsèquement moins besoin de protéines animales que les hommes, les besoins étant comparables à poids égal. *« Aussi, le simple fait que les courbes varient selon les périodes laisse entendre que l'écart intersexe est dû à des facteurs culturels, économiques ou religieux »,* déduit Rozenn Colleter. *« L'histoire de la gastronomie parle surtout de l'aristocratie, mais même dans les banquets — dans le* symposion *grec notamment —, les femmes ne sont pas là,* contextualise de son côté Fabian Müllers, historien de l'alimentation et chargé d'enseignement à l'université d'Angers et de Tours. *Le milieu où l'on festoie est un milieu d'hommes. Durant l'Antiquité, une femme présente à un* symposion*, c'est une femme esclave, ou, dans le* convivium *romain, une matrone* [femme mariée] *si son mari est présent. »* L'imagerie médiévale montre, elle, que l'absence féminine autour des tables perdure. *« La femme est sous-représentée dans l'iconographie des événements festifs liés à l'alimentation, hormis des banquets spécifiques ou des repas de noces »,* précise l'historien. Mais si elle est bien nourrie, son régime alimentaire est assurément moins carné.

De la viande pour les malades et les femmes enceintes

L'une des explications possibles se trouve dans les vertus que l'on attribue à la viande. *« Au Moyen Âge, on estime que la force physique s'y trouve,* éclaire Fabian Müllers. *C'est pourquoi on peut donner de la viande aux malades mais aussi aux femmes enceintes et allaitantes, même durant les jours de Carême et de jeûne. »* La force physique, une qualité requise chez les hommes, quelle que soit leur classe sociale… Pour Rozenn Colleter, l'intérêt de cette étude dépasse en tout cas largement la seule question de la viande. Elle montre que les inégalités entre les sexes sont anciennes, durables et variables selon les contextes, mais aussi qu'elles n'ont rien d'inévitable. Et pour cause, certaines sociétés semblent avoir limité les différences, quand d'autres les ont au contraire accentuées.

Ses travaux ont également soulevé un mystère : celui du déséquilibre hommes-femmes observé dans le nombre même d'individus étudiés. *« Dans notre vaste échantillon, les hommes sont plus nombreux que les femmes, sans raison évidente, alors qu'en toute logique, on devrait avoir un ratio équilibré entre les sexes »,* relève Rozenn Colleter. S'agit-il d'un biais de conservation des os ? Ou d'une différence liée aux pratiques funéraires ? *« La question reste ouverte »,* reconnaît la chercheuse.

L'équipe souhaite désormais appliquer sa méthode à d'autres régions du monde, notamment aux Amériques ou à l'Inde, où les habitudes alimentaires sont très différentes. *« Pendant des siècles, les protéines animales ont été davantage captées par les plus puissants et aujourd'hui encore, dans de nombreuses régions du monde, l'accès aux aliments les plus coûteux reste profondément inégal,* conclut Rozenn Colleter. *Mais cette ancienneté et cette persistance des inégalités alimentaires, en particulier celles liées au sexe, restent définitivement mal comprises. »* ■

INRAP

« On ne s'attendait pas à ce que cette répartition par sexe soit aussi marquée, ancienne, et systématique d'un point de vue chronologique »

Rozenn Colleter, archéoanthropologue à l'Inrap

PHOTO12/ALAMY/CAVAN IMAGES

Au sud du Pérou, un chapelet d'îles rocheuses abrite d'immenses colonies d'oiseaux de mer, attirés par des eaux qui comptent parmi les plus poissonneuses au monde. Leurs déjections sont à l'origine de ce précieux engrais naturel appelé guano.

Les îles à guano, trésor du royaume chincha

Dès l'an 1000, l'utilisation des fientes d'oiseaux marins comme engrais pour les plantations a assuré la prospérité du peuple chincha dans l'actuel Pérou. Un savoir-faire reconnu et admiré par les Incas, dont la renommée est parvenue jusqu'aux conquistadors espagnols.

Pérou, 1532. Un groupe de conquistadors européens, mené par Francisco Pizarro, s'apprête à signer la chute de l'empire inca, en enlevant son souverain : Atahualpa. Avant l'attaque, les chroniqueurs, chargés de consigner la conquête du Pérou, retranscrivent méticuleusement l'organisation de l'empire qu'ils viennent de découvrir, et un détail attire leur attention. Atahualpa n'est pas le seul homme à être transporté sur une litière, un autre dignitaire bénéficie de ce haut privilège : le seigneur chincha.

BRUNO BOURGEOIS

Mais pourquoi le représentant de cet ancien royaume côtier, désormais intégré à l'empire inca, occupe-t-il une place aussi privilégiée ?

Des archéologues australiens et américains suggèrent, dans une étude publiée par la revue *Plos One*, que les Chinchas doivent leur essor considérable à l'exploitation d'une ressource locale : les fientes d'oiseaux de mer. *« Le guano peut sembler trivial et pourtant, nos résultats laissent penser qu'il pourrait avoir contribué de manière significative à l'évolu-*

tion sociopolitique et économique du royaume », révèle Jacob Bongers, archéologue et anthropologue à l'université de Sydney.

Le long de la côte péruvienne, enserrée entre l'océan Pacifique et les hauts sommets de la cordillère des Andes, s'étend une bande aride de plaine côtière. *« Elle s'étire sur plus de 150 km à l'extrême nord du pays, mais se limite à quelque 30 km dans d'autres vallées plus au sud. À cet endroit, si vous prenez la route vers l'intérieur des terres depuis le littoral, vous vous retrouvez en deux heures de voiture à plus de 4000 m d'altitude »,* illustre Nicolas Goepfert, chargé de recherche CNRS au laboratoire Archéologie des Amériques. Au XIe siècle, un royaume s'est établi dans une de ces vallées étroites, le long du fleuve Chincha, couloir d'échanges naturel entre l'océan et les Andes.

STEFANIE ZINGSHEIM

> « Les communautés de la côte péruvienne naviguaient vers des îles proches, sur des radeaux, pour collecter le guano »
>
> **Jacob Bongers,** archéologue et anthropologue à l'université de Sydney (Australie)

Des plants de maïs quatre fois plus riches en azote

Au-delà de l'oasis, la vallée est désertique, mais les plants de maïs y foisonnent et assurent la prospérité d'une population grandissante, qui atteindra près de 100 000 habitants. « *Le maïs était même placé dans les tombes, soit comme offrande symbolique, soit pour nourrir les morts »,* rapporte Jacob Bongers. Avec son équipe, il récolte 35 échantillons de ces pousses dans des « chullpas », des tours funéraires pré-incas en pierre. L'analyse biochimique des plantes révèle des niveaux exceptionnels d'azote. *« D'après nos résultats, les échantillons sont jusqu'à quatre fois plus riches en azote que des plants amendés avec de l'engrais terrestre »,* indique-t-il. Ces taux sont semblables à ceux d'autres plants découverts dans le nord du Chili. Une étude de 2021 concluait alors à l'utilisation de guano comme engrais naturel sur les cultures chiliennes : *« Le régime alimentaire des oiseaux marins est riche en azote, bien plus qu'une vache par exemple,* compare l'archéologue. *Et cet élément est essentiel à la croissance des végétaux. »*

Alors se pourrait-il que les Chinchas aient, eux aussi, épandu des fientes d'oiseaux marins sur leurs cultures pour les rendre plus fertiles ? *« Les écrits de l'ère coloniale que nous avons étudiés rapportent que les communautés de la côte péruvienne naviguaient vers des îles proches, sur des radeaux, afin de collecter du guano, utilisé pour la fertilisation »,* confirme le chercheur. À moins de 25 km des côtes, les îles rocheuses en sont recouvertes, et c'est le résultat de plusieurs singularités géographiques et climatiques. Le courant marin de Humboldt caresse toute la côte et offre au Pérou l'une des eaux les plus poissonneuses au monde — 10 % de la pêche mondiale. Cette abondance attire d'immenses colonies d'oiseaux marins, dont le cormoran de Bougainville, le fou varié et le pélican thage, qui nichent sur ce chapelet d'îles. Le guano s'y accumule sur plusieurs mètres d'épaisseur, car il n'est pas soumis à l'érosion. *« C'est un climat très aride, et peu venteux, qui permet la préservation de ces dépôts »,* note Nicolas Goepfert. L'épandage de guano sur les cultures de maïs a vraisemblablement accru la productivité des plants, et fourni aux Chinchas les ressources alimentaires nécessaires pour leur population. Les Incas ont sans doute été très intéressés par ces surplus autant que par le guano pour améliorer le rendement de leurs cultures en altitude, car ils étaient bien

TECHNIQUE

En altitude, les Incas développent l'agriculture en terrasse

Parallèlement à l'adaptation des Chinchas aux contraintes de leur environnement aride, les Incas s'accommodent, eux, des versants abrupts de la cordillère des Andes. Pour cultiver en altitude, ils construisent des terrasses : les célèbres « andenes », encore visibles aujourd'hui. Elles présentent le triple avantage d'augmenter la surface cultivable, de limiter l'érosion et de retenir l'eau, créant un microclimat propice à l'agriculture. Ces terrasses sont conçues en couches successives, de drainage, de remblais et, enfin, de terre fertile qui pouvait être importée. Mais qu'y trouvait-on ? Qui dit altitude dit souvent tubercules, tels que les pommes de terre, ou pseudo-céréales comme le quinoa, car il s'agit de plantes résistantes au froid et pouvant être conservées longtemps. Un avantage certain pour faire face aux aléas climatiques des montagnes.

STEVE ALLAN/SPL/SUCRÉ SALÉ

Des « andenes », terrasses agricoles incas, ici dans la vallée de l'Urubamba, à 2800 m d'altitude.

plus nombreux : *« La conquête espagnole a fait disparaître 90 % de la population, mais on estime que l'empire inca comptait 20 millions d'habitants. »*
« La véritable puissance des Chinchas ne résidait pas seulement dans l'accès à une ressource ; elle tenait à leur maîtrise d'un système écologique complexe, nuance Jo Osborn, coautrice de l'étude. *Ils possédaient les savoirs traditionnels qui leur permettaient de percevoir le lien entre la vie marine et la vie terrestre, et ils ont transformé ces savoirs en surplus agricoles qui ont permis de bâtir leur royaume. »* La proximité des civilisations pré-incas — telles que les Chinchas et les Chimus établis plus au Nord — avec la faune marine transparaît dans leur art. Les travaux de Jacob Bongers s'appuient sur une série d'artefacts, textiles, céramiques, peintures représentant ensemble des oiseaux de mer, des poissons et des pousses de maïs.

Culture, agriculture et monde naturel étaient indissociables

« Ces découvertes suggèrent une signification culturelle d'importance : les habitants de la vallée du Chincha reconnaissaient sûrement le pouvoir exceptionnel de cet engrais et le célébraient activement, le protégeaient et avaient même des rituels autour de la relation vitale entre les oiseaux marins et l'agriculture », analyse le chercheur. Aujourd'hui encore, on peut déceler des indices de ce rapport à la mer à travers les noms de lieux-dits : le port de Pisco vient du quechua et signifie « oiseau », tandis que Lunahuaná, une petite ville à 190 km au sud de Lima, peut se traduire par « peuple du guano ».
« Il s'agissait d'une société où la culture, l'agriculture et le monde naturel étaient indissociables », résume Jacob Bongers. Les îles de guano étaient même considérées comme une entrée vers l'inframonde, lieu qui accueillait les âmes des défunts dans les cultures pré-incas. Ces sociétés n'envisageaient pas la mort comme une fin, mais comme le seuil d'une nouvelle vie. Les proches du défunt offraient à ce dernier des provisions pour son voyage : lamas, cochons, maïs et pommes de terre, déposés près du corps dans les chullpas. *« L'inframonde comptait plusieurs entrées, toujours des lieux exceptionnels, mais qui différaient en fonction du lieu de vie des populations. Pour les Incas des montagnes, c'étaient des volcans, ou des lacs, mais pour le royaume côtier des Chinchas, il s'agissait probablement des îles à guano »,* rapporte Nicolas Goepfert. Elles appartiennent à la fois aux sphères économique et rituelle, comme en témoignent les données ethno-historiques des premiers chroniqueurs espagnols, qui ont recensé les rites autochtones. On peut lire dans les textes de l'un d'eux, nommé Antón de Arriaga, que les défunts chevauchaient des otaries jusqu'aux îles à guano pour passer dans l'au-delà.

MET/ PUBLIC DOMAIN

Orné de six oiseaux marins sculptés (à droite), ce bâton à fouir cérémoniel illustre la place centrale du guano dans la prospérité des Chinchas.

Le guano aurait contribué aux négociations Incas-Chinchas

Au XVe siècle, avant l'arrivée des conquistadores, le royaume chincha est intégré à l'empire inca. Aucune trace d'affrontements : *« L'acquisition semble avoir été pacifique. C'est un rare exemple d'alliance,* avance Jacob Bongers. *On ne connaît pas les termes du contrat mais on suppose que le guano a joué un rôle très important dans les négociations. »*
Les archéologues optent pour une intégration commerciale.
Depuis des siècles, les Chinchas ont été des intermédiaires privilégiés entre l'océan et les Incas, échangeant pommes de terre et produits des montagnes contre mollusques bivalves, notamment les spondyles et l'huître épineuse, mais aussi du poisson, du maïs issu de leurs récoltes abondantes et… leur engrais local. Quand l'empire inca s'étend vers l'ouest et installe de grands sites sur la côte, il passe donc un accord avec son partenaire de longue date, le royaume chincha, et poursuit l'exploitation des ressources. *« Le guano est devenu si important que les Incas ont alors imposé des restrictions sur les îles durant la saison de reproduction et ont interdit l'abattage des oiseaux marins, sous peine de mort »,* souligne Jacob Bongers. Malgré leur intégration à l'empire inca, les Chinchas ont conservé leur importance stratégique grâce à leur culture maritime et, en particulier, à l'exploitation du précieux guano. *« Cette étude repose seulement sur 35 échantillons, mais ces premiers résultats sont très encourageants. Ils donnent envie de fouiller les anciennes parcelles agricoles pour comprendre à quel point cette pratique était répandue dans d'autres cultures »,* conclut Nicolas Goepfert. ■ **Marie Parra**

La démocratie selon Condorcet

Il y a cinquante ans, un résultat mathématique de Condorcet est retrouvé et réinterprété : le théorème du jury. Son analyse nous donne des pistes pour penser la démocratie de manière plus ample qu'on ne le fait souvent.

Par Antoine Houlou-Garcia

En 1785, le marquis de Condorcet (1743-1794) publie un volumineux ouvrage de 500 pages, au titre aussi long que son contenu : *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix.* Précisons que la pluralité, à l'époque, désigne ce que l'on appelle aujourd'hui la majorité relative ; c'est-à-dire le plus grand nombre de voix, même s'il n'atteint pas la majorité absolue. Précisons également que le marquis s'y intéresse à des « *décisions* » dans un sens assez général : il peut s'agir de la décision d'un jury concernant la culpabilité ou l'innocence d'un accusé, tout comme d'un vote politique, allant d'un référendum à l'élection d'un candidat.

Il y a trois grandes raisons qui expliquent l'intérêt de Condorcet pour les mathématiques électorales. Tout d'abord, il est mathématicien de formation : à 22 ans, il soumet à l'Académie des sciences un mémoire sur le calcul intégral, qui force l'admiration de Jean d'Alembert, devenu son protecteur. Condorcet est rapidement admis à l'Académie des sciences, comme membre puis secrétaire perpétuel. Ensuite, il est très attiré par la politique : à 31 ans, il travaille auprès de Turgot, alors contrôleur général des finances du roi Louis XVI, et ressent l'urgence de mettre de la vérité dans la politique, surtout après que ce dernier a été démis de ses fonctions — ce que Condorcet perçoit comme une injustice.

A. HOULOU-GARCIA

Docteur en études politiques et essayiste, Antoine Houlou-Garcia a publié « Le Théorème du jury de Condorcet. Les mathématiques au service de la démocratie ? » (Les Belles Lettres, 2026).

Enfin, l'idée d'appliquer les mathématiques à la politique est déjà dans l'air : d'une part, au XVII^e siècle, l'Anglais William Petty crée l'arithmétique politique (rationalisation de la politique par une quantification systématique) ; d'autre part, en 1770, le chevalier Jean-Charles de Borda prononce un discours, à l'Académie des Sciences, où il démontre mathématiquement certaines faiblesses de la règle de majorité, et propose deux nouvelles règles électorales fondées sur des raisonnements mathématiques, dont l'une est encore utilisée pour l'élection du Ballon d'or.

Chaque juré est plus fiable qu'une pièce de monnaie tirée à pile ou face

Dans son *Essai* de 1785, le mathématicien propose deux concepts, demeurés très féconds : une règle électorale, nommée *a posteriori* la « méthode de Condorcet », et un résultat probabiliste sur la qualité des décisions prises à la majorité, que l'on appellera le « théorème du jury de Condorcet ». C'est de celui-ci, redécouvert dans les années 1970, que nous parlerons. Le théorème s'énonce ainsi : imaginons que chaque juré ait une probabilité de se tromper inférieure à 50 % (il est plus fiable qu'une pièce de monnaie qu'on tirerait à pile ou face !). Alors on peut montrer mathématiquement deux choses. *Primo*, la probabilité que la majorité du jury prenne la bonne

AUGUSTIN LE GALL/HAYTHAM-REA

Pour lui, la démocratie n'est pas un système figé : elle est en évolution permanente et ne peut vivre que grâce à ses acteurs, les citoyens

décision est supérieure à 50 %. Cet argument permet de justifier l'usage de la règle de majorité d'un point de vue épistémique. *Secundo*, plus le nombre de jurés augmente, plus la probabilité que l'ensemble du jury prenne la bonne décision augmente ; à tel point qu'avec un jury composé d'une infinité de jurés (un cas bien sûr purement théorique), on aurait la certitude absolue que la bonne décision soit prise. Ce raisonnement permet ainsi de justifier une ouverture du suffrage au plus grand nombre possible ; et met en lumière la démocratie comme un système qui produit de bonnes décisions grâce à l'usage du vote à la majorité.

Mais les hypothèses de tout résultat mathématique doivent être vérifiées pour qu'on puisse en déduire les conséquences. D'abord, la compétence des électeurs : ont-ils vraiment une probabilité de se tromper inférieure à 50 % ? Condorcet lui-même pensait que non. Plus problématique : peut-on raisonnablement modéliser les électeurs comme des phénomènes aléatoires qui ont une probabilité de prendre telle ou telle décision ? Voter est une affaire de conviction : on ne vote pas au hasard mais de façon déterministe. Enfin, que signifie « se tromper » dans une élection ? Dans le cadre d'un jury de procès, où l'on doit déterminer la culpabilité ou l'innocence d'un accusé, soit ; mais pour une élection, qui oserait dire que tel candidat est une « erreur » objective et que tel autre est « la bonne option » : c'est évidemment une affaire de convictions personnelles. Il existe, certes, des vérités factuelles, mais elles n'impliquent pas l'existence d'une vérité politique. Ce qui n'implique pas pour autant de tomber dans un relativisme total.

Ainsi, de nombreux mathématiciens et penseurs du XIXe siècle se sont opposés à la modélisation de Condorcet, parfois de façon virulente comme le philosophe britannique John Stuart Mill ou l'académicien français Joseph Bertrand. De fait, ce résultat n'a aucun sens en théorie politique, ce qui n'empêche qu'il est aujourd'hui le pilier de la théorie épistémique de la démocratie, un courant né sous l'impulsion de l'Américain Joshua Cohen, en 1986, et particulièrement important depuis les années 2000. L'idée initiale était d'ailleurs de s'opposer à un autre résultat mathématique qui tendait à montrer l'irrationalité de la démocratie *(lire l'encadré ci-dessous)*. Il est indéniable que la quantification est

Un mode de scrutin vaut-il mieux qu'un autre ? Comment s'assurer de sa justesse ? Quelles sont ses limites ? Autant de questions posées par Condorcet et qui restent d'actualité.

un outil important pour comprendre et gouverner une société. Néanmoins, en gouvernant des indicateurs statistiques, on ne gouverne pas un pays composé d'êtres humains et on oublie l'essentiel de ce que devrait être la politique. De la même manière, si on réduit la démocratie au vote, on perdra beaucoup de choses sur ce qu'est, ou pourrait être, la démocratie. Or, c'est quelque peu l'excès commis par une partie de la recherche en théorie politique : avoir concentré tous ses efforts sur le vote, quitte à négliger le reste. Pourtant, Joshua Cohen, le fondateur du courant épistémique de la démocratie, avait bien alerté dès 1986 : une défense de la démocratie fondée essentiellement sur la procédure de vote ne peut mener nulle part.

Cela reflète pourtant ce que nous concevons en général : pour le commun des mortels, la démocratie se réduit à aller voter — ou pas, d'ailleurs — une fois de temps en temps. En 1939, face à la montée des populismes et des totalitarismes, le philosophe américain John Dewey notait : *« Nous avons agi comme si la démocratie était quelque chose qui avait lieu principalement à Washington [...] sous l'impulsion de ce qui s'est passé lorsque des hommes et des femmes se rendaient aux urnes environ une fois par an [...]. Ces dernières années, nous avons entendu de plus en plus fréquemment que cela ne suffisait pas ; que la démocratie est un mode de vie.* » Une leçon qu'on pourrait marteler encore aujourd'hui. De fait, si l'on en revient à la fondation de l'Athènes démocratique par les réformes de Clisthène (vers 508 avant notre ère), l'ADN de la démocratie est que des gens n'ayant aucune raison de se rencontrer soient incités à se parler, à discuter de politique, c'est-à-dire du chemin qu'ils peuvent construire ensemble.

TALLANDIER / BRIDGEMAN IMAGES

Nicolas de Condorcet (1743-1794), mathématicien, philosophe et homme politique, est une figure intellectuelle marquante des Lumières.

Une reformulation du théorème prenant en compte l'intérêt collectif

Alors, le théorème du jury de Condorcet n'a-t-il aucun intérêt pour nous ? Au contraire ! Reprenons la pensée politique de Condorcet, en particulier lorsqu'il est lui-même engagé en politique (il est député de 1792 à sa mort en 1794). Pour lui, la démocratie n'est pas un système figé dans lequel il suffit de voter : elle est en évolution permanente et ne peut vivre que grâce à ses acteurs, les citoyens, qui se forment à être citoyens tout au long de leur vie en discutant, en se fréquentant et en se comprenant mutuellement. Cela n'implique pas pour autant d'être d'accord avec les autres, mais de s'ouvrir à leur point de vue.

On peut alors transformer le théorème du jury en ce que l'on pourrait qualifier de propriété de l'intérêt collectif de Condorcet : plus les électeurs voteront en pensant aux autres, plus il est probable que le résultat servira un intérêt collectif. Cette reformulation, plus cohérente avec la pensée politique du Marquis, est une propriété mathématique compatible avec la démocratie et révélatrice de son bon fonctionnement.

Le vote n'est alors plus qu'un petit point de la démocratie, qui s'inscrit dans une réflexion non seulement personnelle mais surtout et essentiellement collective. Car on ne naît pas citoyen ou citoyenne : on le devient en s'ouvrant à un collectif, qu'on l'aime ou non. La démocratie ne peut être fondée sur l'imaginaire d'un individu seul au monde, mais bien sur des citoyens vivant parmi leurs concitoyens. En reprenant une expression, tirée des *Épîtres à la Princesse,* de Léopold Sédar Senghor, on pourrait la qualifier de démocratie *« au fil de l'Autre »*. ■

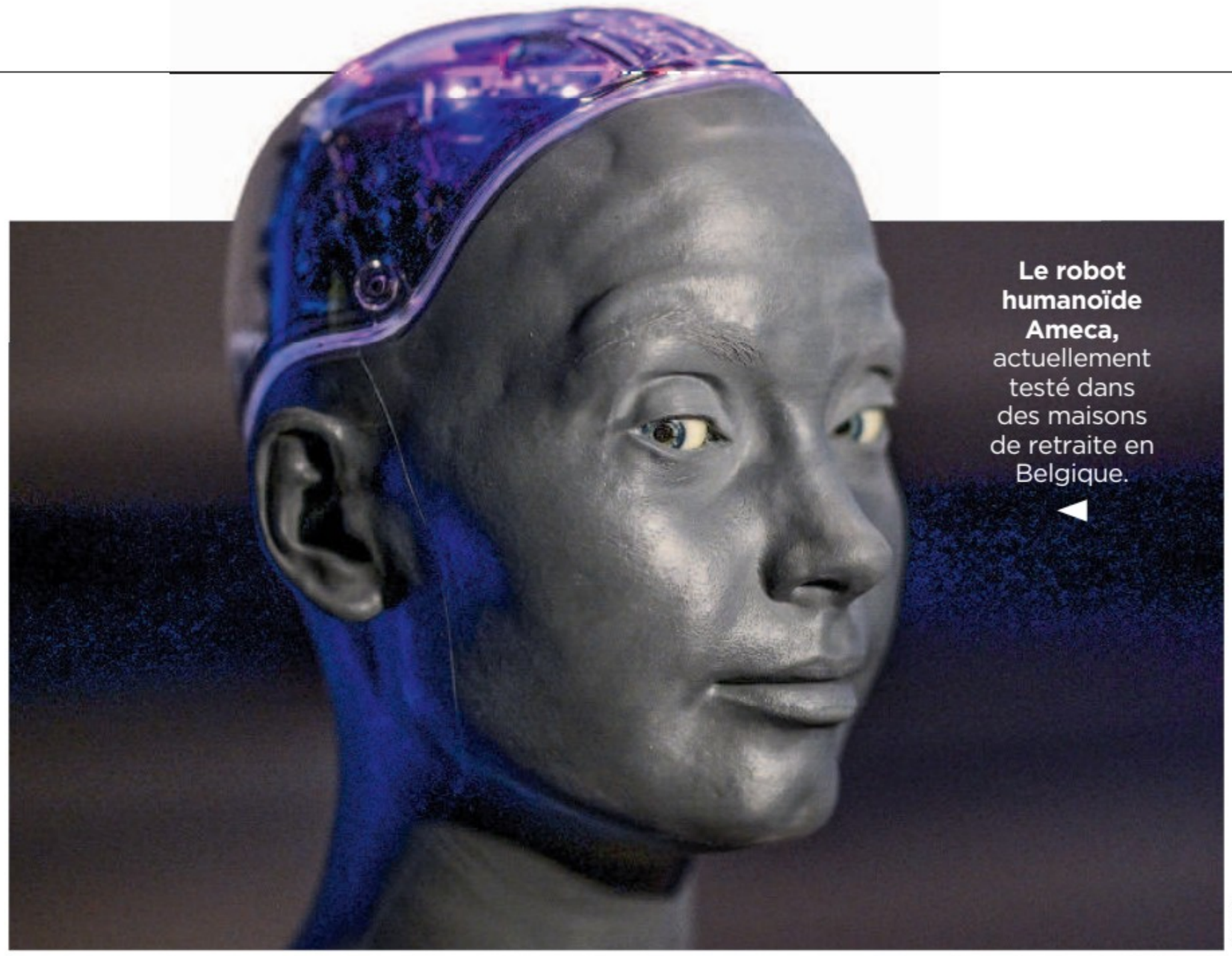
THÉORIE

Les mathématiques s'affrontent sur la démocratie

Le succès du « théorème du jury » provient de l'état de la recherche dans les années 1970 : William Riker, politologue très influent, avait popularisé auprès des théoriciens politiques un autre résultat mathématique, le « théorème d'impossibilité d'Arrow ». Au début des années 1950, l'Américain Kenneth Arrow, prix Nobel d'économie en 1972, avait montré que toute règle de vote pouvait aboutir à un cycle majoritaire : une majorité de gens préfère A à B, une autre majorité préfère B à C, une autre préfère C à A. Ainsi, A > B > C > A. Le résultat de cette intransitivité de la préférence collective ? Il est impossible de savoir qui est véritablement préféré. D'où l'on a déduit que l'irrationalité plane sur la démocratie, telle une épée de Damoclès. Ce théorème n'est pourtant pas interprétable comme tel : il n'y a rien d'irrationnel à préférer les pommes aux poires pour leur goût, les poires aux oranges pour leur texture et les oranges aux pommes pour leurs vitamines. On a donc pomme > poire > orange > pomme sans être irrationnel. Dans un brouillon non publié, Condorcet avait d'ailleurs établi un contre-exemple de ce type. Ainsi, deux arguments mathématiques ont influencé une grande partie de la théorie politique contemporaine, tous deux issus de l'*Essai* de 1785, même si la pensée politique de Condorcet était bien plus subtile.

Chez votre marchand de journaux

GETTY IMAGES



Le robot humanoïde Ameca, actuellement testé dans des maisons de retraite en Belgique. ◀

ABACA

L'espèce humaine sous la férule des IA

L'essayiste et président d'Arte Bruno Patino livre une réflexion éclairante sur notre servitude numérique, et ses effets sur le devenir humain.

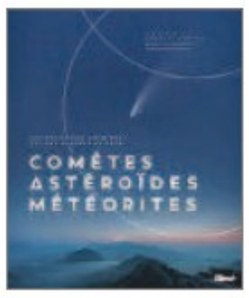
CIVILISATION Quelle sera la nature de l'espèce humaine ? L'avènement d'une intelligence artificielle générale, émancipée de sa fonction d'outil et dotée d'autonomie, serait-il en passe de sceller le destin de *Sapiens*, en mettant fin à son chemin évolutif ? Bruno Patino, président d'Arte et essayiste, renoue ici avec les problématiques de la dépendance au numérique et de la marchandisation de l'attention, et en formule l'hypothèse. Sa réflexion éclairante décrit un mouvement de bascule en trois temps, menant vers une — inéluctable ? — domination de l'humain par des IA indissociables des aspects les plus intimes de sa vie. L'auteur dénombre et analyse : l'ère de l'accès, au début d'Internet en 1989, fut promesse d'ouverture sans fin à l'information, où couvait pourtant le dessein du contrôle de l'outil. Cela aura enterré la révolution Gutenberg, dont l'invention avait « *modifié le régime de la connaissance* ». L'ère de la propagation, avec le lancement de l'iPhone en 2007, marqua l'accélération des interactions, la connexion permanente, l'essor d'une économie de l'extraction des données personnelles, clé d'un technocapitalisme indétrônable. Enfin, l'ère de l'imbrication, celle de la création de ChatGPT en 2022, est dominée par le mélange croissant de l'authentique (l'humain) et du synthétique (la machine). Que nous n'en soyons qu'aux prémices d'une époque où nos désirs, nos émotions, nos doutes, nourrissent des IA proposées comme compagnons de vie, inspire à l'auteur une conclusion teintée d'espoir : tout n'est pas perdu si nous ne détournons pas le regard des pièges qui nous sont tendus, et si nous sacralisons le cerveau ! ■ **Andreina De Bei**

Le Temps de l'obsolescence humaine, Bruno Patino, Grasset, 208 p., 18 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Questions de lecteurs p. 94
▶ Courrier p. 95
▶ Le ciel du mois p. 96
▶ À retrouver sur notre site p. 98

Fragments célestes



COSMOS On recense actuellement 75 000 météorites, fragments d'objets célestes tombés sur notre planète. Elles fournissent des informations inestimables sur les petits corps qui peuplent notre système solaire. Ce livre, richement illustré, leur est consacré. En s'appuyant sur les recherches les plus récentes, il décrypte avec pédagogie la diversité de ces corps errants, tout en retraçant leur origine dans le disque protoplanétaire. Il explique aussi le rôle que les chutes d'astéroïdes et de comètes ont joué dans l'histoire de notre planète. ■ **F. D.**

Comètes, astéroïdes, météorites : les poussières cosmiques qui ont façonné la Terre, Glénat, 224 p., 36 €

Le savoir confisqué

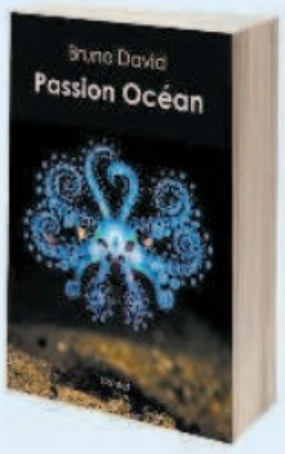
ENQUÊTE Invisible, mais là. Le processus de construction du savoir scientifique se déploie de manière déséquilibrée, constate Marion de Vevey. Alors qu'elle étudie les singes en Afrique de l'Est, elle s'interroge : les précieuses connaissances de son assistant ougandais ne lui donnent pas droit au titre de collaborateur scientifique. Décidée à comprendre les dynamiques Nord-Sud dans la recherche, elle arpente les problématiques de cette fabrique du savoir dominée par l'Occident. ■ **A. S. A.**

Tout ce qu'il reste à découvrir : enquête sur l'invisibilisation du Sud dans les sciences, Marion de Vevey, Quanto, 280 p., 22 €

Éloge du vivant

ÉCOLOGIE Dans ce joli livre illustré par ses aquarelles, Gilles Clément dialogue avec Yorgos Archimandritis. Il raconte la découverte du vivant pendant l'enfance, retrace l'évolution de son regard, fondé sur la contemplation et l'observation, et la naissance d'une vision qui le mènera du respect de l'esprit du lieu à la conception de la *« friche apprivoisée »* et du jardin planétaire. En conclusion, dans un court texte satirique titré « Dystopia », il égrène les dégâts que nous avons causés à la Terre, et demande l'avis d'un extraterrestre sur cette brûlante question. ■ **A. De B.**

Un jardin pour l'éternité, Gilles Clément et Yorgos Archimandritis, Arthaud, 160 p., 21 €



Avoir le pied marin

BIODIVERSITÉ Si l'eau des océans ne représente que 0,5 % de la masse totale de la Terre, elle joue et a joué par le passé un rôle essentiel pour la vie terrestre. C'est ce que démontre l'auteur, spécialiste de la vie marine, qui décrit dans un premier temps les particularités étonnantes des mondes océaniques. Où l'on apprend, par exemple, qu'il faut 1000 ans à une goutte d'eau pour parcourir le trajet de la circulation thermohaline, que l'océan est bosselé, avec une différence d'altitude de près de 200 mètres entre certains de ses points. Après une description des diverses inventions — du bathyscaphe aux robots autonomes — qui ont permis d'explorer la mer, le naturaliste nous entraîne à la découverte de son incroyable biodiversité, dont 90 % serait encore à découvrir. En une seule circumnavigation, réalisée avec la goélette *Tara* en 2009, les scientifiques ont identifié plus de 150 000 nouvelles espèces planctoniques ! L'auteur interroge aussi l'avenir de ces milieux largement méconnus, et soumis désormais aux multiples pressions et pollutions humaines. Une lecture qui incite à plus de sagesse. ■ **Sylvie Rouat**

Passion océan, Bruno David, Grasset, 256 p., 20 €

Sous haute surveillance

RÉCIT En avril 1986, la catastrophe de Tchernobyl a répandu près de 12 milliards de milliards de becquerels dans l'environnement. L'historienne Galia Ackerman revient sur les années qui ont précédé et suivi ce désastre nucléaire à travers les archives du KGB. Dans l'ex-URSS, cette organisation se voulait *« les yeux et les oreilles du Parti »* dans toute la société. Or, ses rapports révèlent une réalité où ultrasurveillance et impuissance se côtoient, face à l'étendue des défaillances, de l'incompétence, de la corruption. Après l'accident, elle s'acharnera à maintenir le secret, quitte à sacrifier sa population. ■ **S. R.**

Le KGB à Tchernobyl, Galia Ackerman, Premier Parallèle, 217 p., 19 €

Sapiens à la barre

BD Le procès des zoonoses est ouvert. Sur le banc des accusés, un singe, un pangolin, un vison, une vache, un poulet, entre autres. L'enjeu des débats : leur responsabilité dans les multiples pathologies contagieuses qui s'attaquent à l'humanité — tuberculose, grippe, sida, rage, Covid-19, etc. Alors, certes, ces maladies sont animales à l'origine. Pourtant, elles n'auraient probablement jamais atteint l'espèce humaine si celle-ci ne s'ingéniait pas à déséquilibrer et à fragiliser les écosystèmes, à détruire les espaces naturels et la biodiversité, à déloger et prélever les espèces vivantes pour les parquer par millions dans des conditions immondes pour l'élevage industriel. L'auteur, Frédéric Keck, directeur de recherche au CNRS, est anthropologue et philosophe. Accompagné du trait précis et inventif de sa dessinatrice Héloïse Chochois spécialisée dans la vulgarisation scientifique, il nous invite à repenser notre responsabilité dans les pandémies. ■ **H. R.**

Les Animaux malades des humains, Frédéric Keck, Héloïse Chochois, Delcourt, 128 p., 22,50 €

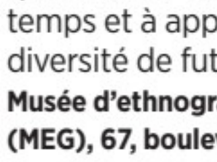
C'EST À VOIR

▶ **Ce symbole désigne les nouvelles expositions**

EXPOSITIONS

Amboise (37)

▶ **Léonard de Vinci, Maître de l'eau**
Au cœur du Château du Clos Lucé, cette exposition consacrée au maître de la Renaissance rassemble des pièces exceptionnelles, telles que les dessins originaux du *Codex Atlanticus,* des maquettes de ses inventions et des machines hydrauliques.
Château du Clos Lucé, 2, rue du Clos Lucé, jusqu'au 13 septembre. Rens.: 02.47.57.00.73.



Arc-et-Senans (25)

▶ **Mystification. Architecture et cinéma, la quête de l'illusion**
La Saline royale d'Arc-et-Senans explore le thème de l'illusion à travers l'architecture et le cinéma, deux disciplines maîtres dans l'art de tromper le regard.
Saline royale d'Arc-et-Senans, jusqu'au 28 février 2027. Rens.: 03.81.54.45.00.

Genève (Suisse)

▶ **Le futur, c'est quoi ?**
Robots, tarots ou objets du quotidien matérialisent notre manière d'imaginer l'avenir, à travers les cultures et les époques. Un parcours ludique qui invite à questionner notre rapport au temps et à appréhender une diversité de futurs.
Musée d'ethnographie de Genève (MEG), 67, boulevard Carl-Vogt, jusqu'au 10 janvier 2027. Rens.: +41.2.24.18.45.50.

Guilvinec et Léchiagat (29)

▶ **La mer en partage**
Installé le long du port, ce festival photographique à ciel ouvert célèbre la mer et ceux qui en vivent. Il retrace les enjeux humains, sociaux et environnementaux liés aux océans, alliant beauté des paysages et fragilité des équilibres maritimes.
Communes de Guilvinec et Treffiagat-Léchiagat, jusqu'au 30 septembre. Rens.: 07.67.55.40.39.

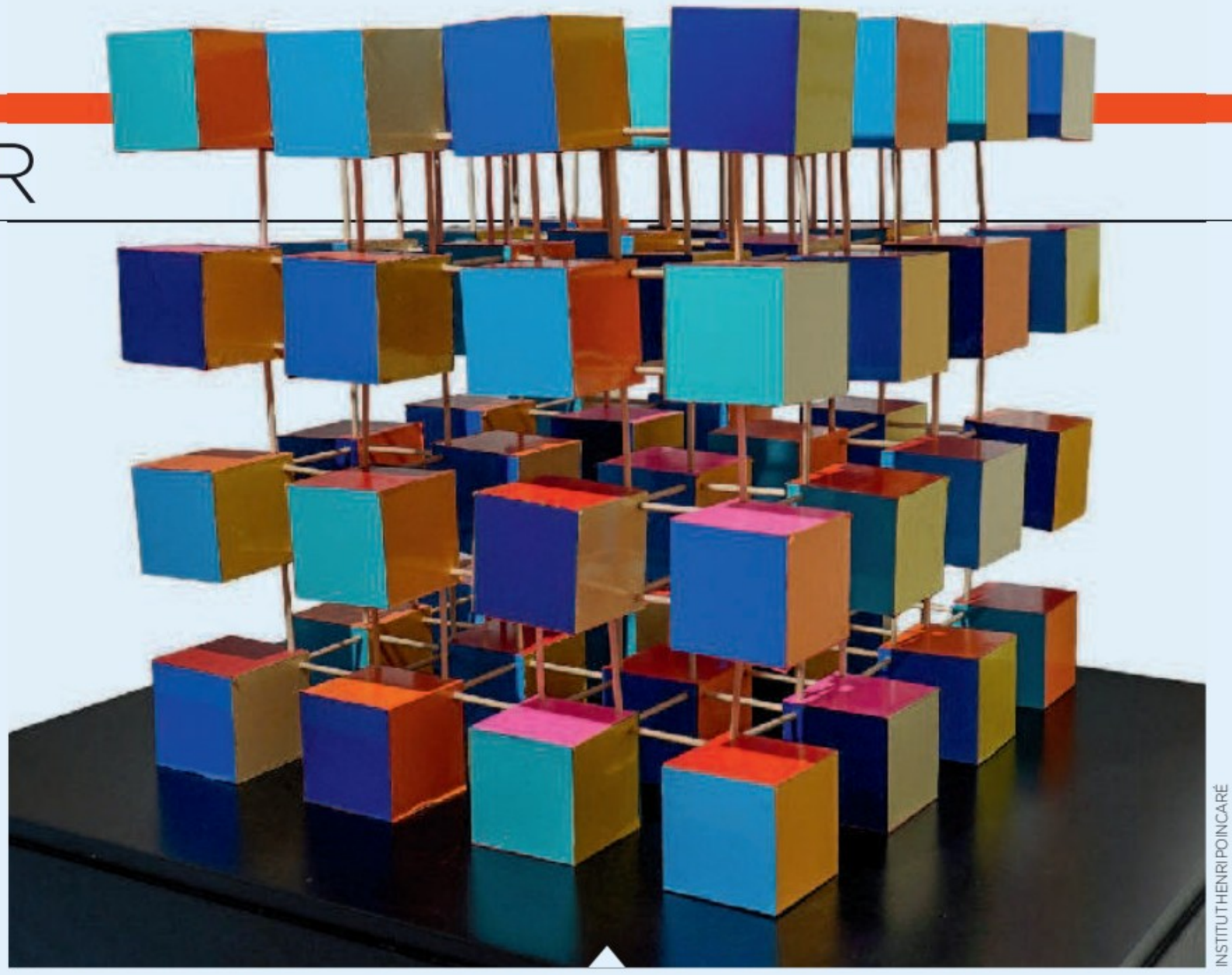
Lyon (69)

Au Mali, quand les animaux dansent
Les *Sogow bò*, ces spectacles ancestraux mêlant théâtre, danse et musique, sont mis à l'honneur. Masques d'animaux et marionnettes s'animent pour donner vie aux mythes et légendes du Mali.
Musée des confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 7 février 2027. Rens.: 04.28.38.12.12.

Paris (75)

Cartes imaginaires. Inventer des mondes
La cartographie ouvre une porte d'entrée vers des territoires mythiques, littéraires ou fantastiques, emportant le visiteur à travers époques et cultures. Parmi les 200 œuvres présentées, de nombreuses pièces d'exception.
BNF François-Mitterrand, quai François-Mauriac, jusqu'au 19 juillet. Rens.: 01.53.79.53.79.

▶ **La Marine et les peintres. Quatre siècles d'art et de pouvoir**
Depuis le XVIIe siècle, des artistes sont mobilisés pour construire la puissance maritime française. Des grandes batailles navales au régime de Vichy, l'exposition retrace l'histoire de l'art officiel français et de ses liens avec l'institution navale.
Musée national de la Marine, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 2 août. Rens.: 01.53.65.69.48.



INSTITUT HENRI POINCARÉ

« Cube arabo-gréco-latin », de François Gaudel (2026).

Paris (75) / Exposition

Création, entre arts et mathématiques

Comment se représenter une équation du 3e degré ? À quoi correspond-elle dans le monde réel ? À une courbe, des points, une composition dans l'espace… Ici, toutes les œuvres d'art trouvent leur origine dans des théorèmes ou des concepts mathématiques. Matérialiser le mouvement, les contraintes mécaniques, les nœuds, les volumes, le chaos ou l'infini, tel est le défi de cette exposition. Le parcours offre une approche sensible des mathématiques, discipline souvent perçue comme abstraite. Ainsi, les mathématiciens utilisent l'art pour rendre perceptibles leurs idées et les artistes trouvent, dans les mathématiques, de nouveaux outils pour développer des langages. D'ailleurs, mathématiques et arts se rejoignent aussi dans leur processus de création, qui n'est autre qu'une transformation expérimentale d'une pensée en une forme ou un objet. L'exposition s'inscrit dans le prolongement du programme scientifique « L'illustration comme technique de recherche mathématique ». ■ **Thaïs de Bastard**

Maison Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie-Curie, jusqu'au 25 juillet. Rens.: 01.44.27.64.73.

Plumes du paradis
Maître dans l'art de la parade, l'oiseau de paradis fascine depuis les premiers siècles de notre ère, bien au-delà des forêts de Nouvelle-Guinée dont il est originaire.
Musée du quai Branly – Jacques Chirac, 37, quai Branly, jusqu'au 8 novembre. Rens. : 01.56.61.70.00.

Préhistoire : entre utopie et réalité
Visions fantasmées ou reconstitutions scientifiques ? Une mise en regard de la recherche préhistorique et des récits sur les origines de l'humanité.
Collège de France, 11, place Marcelin-Berthelot, jusqu'au 19 juillet. Rens. : 01.44.27.11.47.

Réouverture des catacombes
Après plusieurs mois de travaux, les catacombes de Paris rouvrent avec un parcours entièrement repensé. Une nouvelle scénographie et des dispositifs immersifs redonnent vie à ce patrimoine souterrain.
Les catacombes de Paris, 1, avenue du Colonel Henri-Rol-Tanguy. Rens. : 01.43.22.47.63.

Paris (75) / Exposition

Frontière

A. ROBIN – EPPDCSI

Zone démilitarisée entre les deux Corées (installation).

Épousant parfois le tracé d'un fleuve ou une chaîne de montagnes, la frontière demeure le fruit d'une construction humaine. Concept géopolitique central, elle structure notre rapport au monde en délimitant les territoires, en protégeant et en régulant la circulation des biens et des personnes. Pour disséquer cette notion au cœur de l'actualité, neuf études de cas sont convoquées. Par exemple, une immersion audiovisuelle le long de la frontière entre les deux Corées plonge le visiteur dans cette zone déserte ultramilitarisée, où seuls résonnent les cris des oies et les chœurs de l'armée. Le parcours révèle aussi des formes de frontières plus inattendues, à l'image de celles du cyberespace. ■ **Émilie Proumen**

Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 2 janvier 2028. Rens. : 01.40.05.70.00.

Rennes (35)

Impact. La biodiversité en questions
Interroger notre relation au vivant et réinventer une société moins pesante sur notre écosystème, tels sont les défis proposés à l'occasion de cette exposition sur la biodiversité.
Espace des Sciences, 10, cours des Alliés, jusqu'au 30 août. Rens. : 02.23.40.66.00.

Rouen (76)

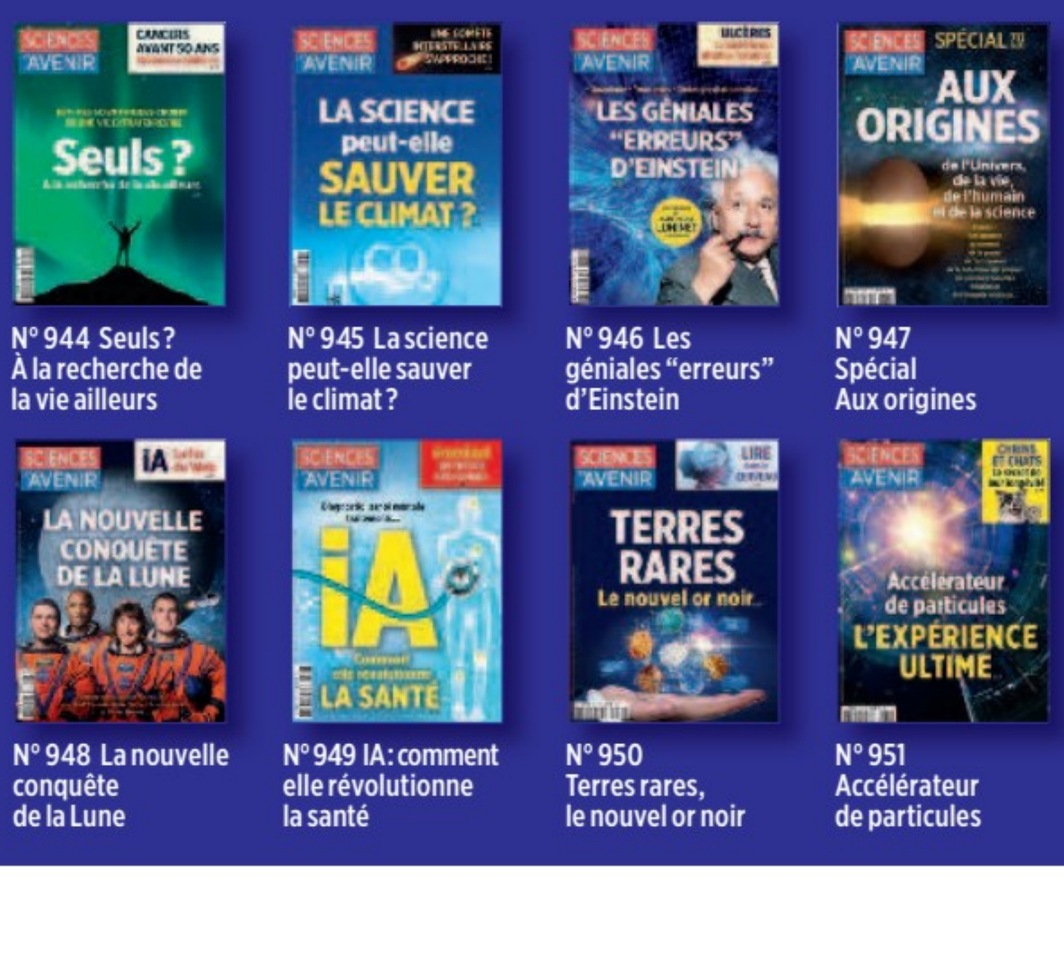
Sous la pluie. Comprendre, vivre et s'adapter
Au Pavillon des transitions, la célèbre « pluie normande » est déclinée sous toutes ses facettes : cycles de l'eau, orages, source de vie, défis climatiques.
Pavillon des Transitions, quai de Boisguilbert, jusqu'au 30 juin. Rens. : 02.76.30.32.10.

Scannez ce QR code pour retrouver toutes les expositions

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

Festival Double Science
La 4e édition revient les 12 et 13 juin au Ground Control. Festival gratuit, tout public et transdisciplinaire, il propose un format original de vulgarisation scientifique mêlant innovation culturelle et immersion festive.
Ground Control, 81, rue du Charolais 75012 Paris
Rens. : www.festivaldoublescience.fr

Une formidable diversité
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous



N° 944 Seuls ? À la recherche de la vie ailleurs
N° 945 La science peut-elle sauver le climat ?
N° 946 Les géniales "erreurs" d'Einstein
N° 947 Spécial Aux origines
N° 948 La nouvelle conquête de la Lune
N° 949 IA : comment elle révolutionne la santé
N° 950 Terres rares, le nouvel or noir
N° 951 Accélérateur de particules

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir - service des abonnements 45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 944 ❑ N° 945 ❑ N° 946 ❑ N° 947
❑ N° 948 ❑ N° 949 ❑ N° 950 ❑ N° 951

Nom : ..... Ville : .....
Adresse : .....
.....
Code postal : .....

Posez vos questions sur la page **Facebook** de **Sciences et Avenir** ou par **courriel**

Là où l'humain distingue une riche palette de couleurs, les animaux perçoivent mal le rouge, par exemple.

GETTY IMAGES

OPTIQUE

Pourquoi ne voyons-nous pas les mêmes couleurs que les autres animaux ?

Alpha Y.

Pensez à un coquelicot éclatant dans un champ. À nos yeux, il est d'un rouge uniforme, presque banal. Mais pour une abeille en quête de nectar, cette fleur ressemble à tout autre chose : une cible lumineuse, ornée de motifs ultraviolets invisibles pour nous. Ce simple décalage résume une réalité fascinante : la perception de la couleur n'est pas une propriété absolue du monde, mais une construction biologique, propre à chaque espèce.

Tout commence dans la rétine. Chez l'humain, elle abrite deux types de photorécepteurs : les bâtonnets, pour la vision en faible luminosité, et les cônes, qui permettent de distinguer les couleurs. Nous en possédons trois types, sensibles au bleu, au vert et au rouge : on parle de vision trichromatique, à l'origine de la richesse de notre palette visuelle.

Pourtant, cette configuration est loin d'être universelle. La plupart des mammifères, comme les chiens ou les chats, n'ont que deux types de cônes. Ils perçoivent donc mal les rouges, ce qui rend un objet écarlate presque terne à leurs yeux. À l'échelle moléculaire, cette différence repose sur une protéine clé : l'opsine. De légères variations de cette molécule modifient la longueur d'onde captée par les cônes. Une étude publiée en 2024 par des chercheurs de l'université Johns-Hopkins (États-Unis) a montré que la répartition des cônes est finement orchestrée pendant le développement, sous l'influence de l'acide rétinoïque, un dérivé de la vitamine A. Ce « minuteur biologique » régule l'équilibre entre cônes sensibles au vert et au rouge, façonnant notre perception des couleurs.

Pourquoi cette sensibilité au rouge est-elle apparue chez l'humain et quelques primates ? Probablement pour des raisons alimentaires : distinguer des fruits mûrs dans la végétation dense aurait offert un avantage évolutif décisif. Toutefois, notre vision n'est pas supérieure : d'autres espèces perçoivent des longueurs d'onde invisibles pour nous. Les abeilles et de nombreux oiseaux voient dans l'ultraviolet, révélant des motifs et des signaux qui structurent leur comportement. Et même chez l'humain, la couleur reste une expérience personnelle. La proportion de cônes varie d'un individu à l'autre, modifiant subtilement la perception des teintes sans que nous en ayons conscience. ■

Lise Loumé

PHYSIQUE

D'où vient le vent ?

Richard M.

Le vent naît du mouvement de l'air entre des zones de pression différentes. L'air s'écoule des régions de haute pression vers celles de basse pression pour rétablir l'équilibre. Ce mouvement est dévié par la rotation de la Terre (c'est la force de Coriolis) et modifié par les reliefs et les obstacles. À grande échelle, ces forces organisent des vents réguliers comme les alizés ou les vents d'ouest. À plus petite échelle, elles produisent rafales et vents locaux, dont la direction et l'intensité varient sans cesse. C'est ce jeu d'équilibres dynamiques qui anime en permanence l'atmosphère. ■ **L. L.**

PALÉOANTHROPOLOGIE

Lucy est-elle notre ancêtre ?

Oscar C.

Découverte en 1974, au nord-est de l'Éthiopie, Lucy est un *Australopithecus afarensis* vieux de 3,2 millions d'années. Un temps, cette femelle bipède d'un mètre de haut a été considérée comme l'ancêtre directe de l'humanité. Son squelette, exceptionnellement complet à 40 %, a éclairé la bipédie des premiers hominines et leur mode de vie. Mais les recherches ont corrigé cette image : Lucy appartient à une branche déjà distincte de celle du genre *Homo*. Plus qu'une « grand-mère » de l'humanité, elle serait donc une lointaine cousine, précieuse pour comprendre une évolution humaine buissonnante et complexe, faite de multiples lignées. ■ **Astrid Saint-Auguste**

Courriels à : courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

« Astrophysique : les trous noirs de masse intermédiaire se dévoilent »
(*Sciences et Avenir* n° 951, mai 2026)

Merci pour votre mensuel, toujours excellent et en pointe sur les progrès scientifiques. Dans l'article sur l'astrophysique, on parle du spin des trous noirs. Le sens de rotation, si on définit par rapport à un référentiel, peut être horaire ou antihoraire, et les axes de rotation éventuellement aussi très différents. Donc une simple addition, ou soustraction, n'est pas possible, sauf exception. Cela doit forcément intervenir dans les calculs de l'objet final de la fusion et l'observation que l'on en fait. Mais on ne nous dit rien de ces complications, ni comment elles sont résolues.

Virgile Woringer

S. et A. : Merci beaucoup pour votre remarque très pertinente. Vous avez tout à fait raison : le spin d'un trou noir n'est pas une quantité que l'on peut additionner simplement. C'est une grandeur vectorielle, avec une intensité et une direction, et son évolution lors d'une fusion est effectivement complexe. Comme me l'a précisé l'astrophysicienne Marta Volonteri, lors d'une fusion, le spin final dépend de plusieurs facteurs : l'intensité et l'orientation des spins initiaux, la configuration orbitale du système, ainsi que les pertes de moment angulaire sous forme d'ondes gravitationnelles. Ces effets sont décrits par des calculs issus de la relativité générale et étudiés grâce à des simulations numériques. Ces processus de fusion tendent donc à produire en moyenne des trous noirs en rotation rapide, sans qu'il y ait pour autant une « simple » addition des spins initiaux. Dans d'autres contextes, comme l'accrétion de matière, l'évolution du spin dépend aussi de l'orientation du gaz qui tombe vers le trou noir. L'effet dit de Bardeen-Petterson tend à aligner (ou anti-aligner) le disque d'accrétion avec l'axe de rotation du trou noir, ce qui peut soit augmenter, soit diminuer son spin.

Chiens et chats

J'ai relu avec attention votre article sur les recherches pour améliorer la longévité des chiens et des chats (*S. et A.* n° 951). Vous détaillez les espérances de vie moyennes pour chaque animal, mais vous n'évoquez pas les records de durée de vie. Je viens de perdre mon chat Shakespeare à l'âge de 17 ans, mais je pense que certains félins ont vécu beaucoup plus vieux.

Véronique M.

S. et A. : En effet, votre animal a eu une belle vie mais c'est loin d'être le record. Chez les chats, il est détenu par une femelle du nom de Creme Puff, selon le *Guinness World Records*. Née le 3 août 1967 et décédée le 6 août 2005 à Austin, dans l'État du Texas (États-Unis), elle avait 38 ans et 3 jours à sa mort. Elle mangeait parfois des asperges, des œufs ou encore de la crème épaisse. Quant au chien le plus âgé, il s'agit d'un bouvier australien nommé Bluey, qui vivait en Australie (1910-1939), disparu à 29 ans et 5 mois.

PHOTO12

Fresque murale
célébrant le chien Bluey, à Rochester (Australie).

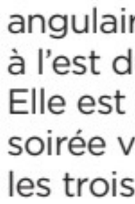
LE CIEL DE JUIN

PAR JOHAN KIEKEN

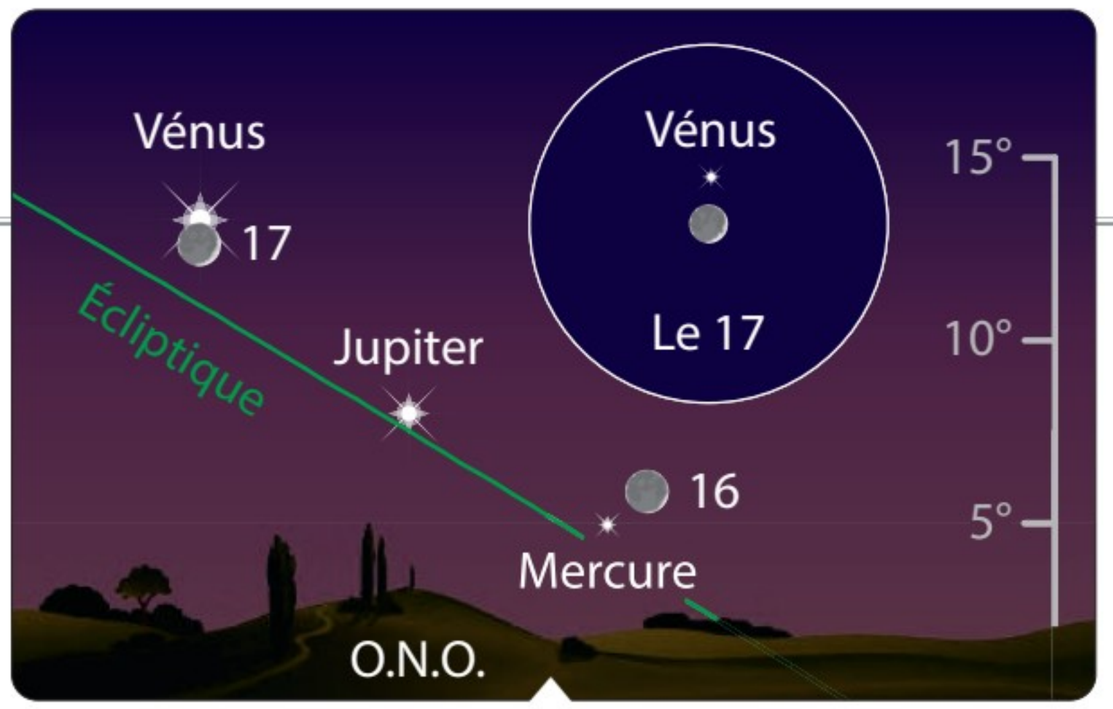
Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (près de 25°) à l'est du Soleil le 15. Elle est observable en soirée vers le couchant les trois premières semaines du mois, dans les lueurs du crépuscule.

VÉNUS L'étoile du Berger attire inévitablement l'œil en soirée vers le couchant. Elle ne semble presque pas bouger au cours du mois, et se couche tous les soirs un peu plus de 2 h après le Soleil.



MARS La planète Rouge devient timidement observable en seconde quinzaine vers l'est en fin de nuit. Rapidement effacée par la montée de luminosité du ciel le matin, elle ne se trouve pas dans de bonnes conditions d'observation et reste difficile à repérer.



Nous sommes une heure après le coucher du Soleil. La vue aux jumelles présente le rapprochement du 17 entre la Lune et Vénus, alors séparées par moins d'un demi-degré.

Un quatuor au couchant

LES 16 ET 17, UNE HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, un fin croissant de Lune, accompagné de sa lumière cendrée, rejoint Vénus, Jupiter et Mercure bas sur l'horizon ouest-nord-ouest. Alignés le long de l'écliptique, ces astres offrent un beau rapprochement, Mercure restant délicate à déceler dans les lueurs du crépuscule.

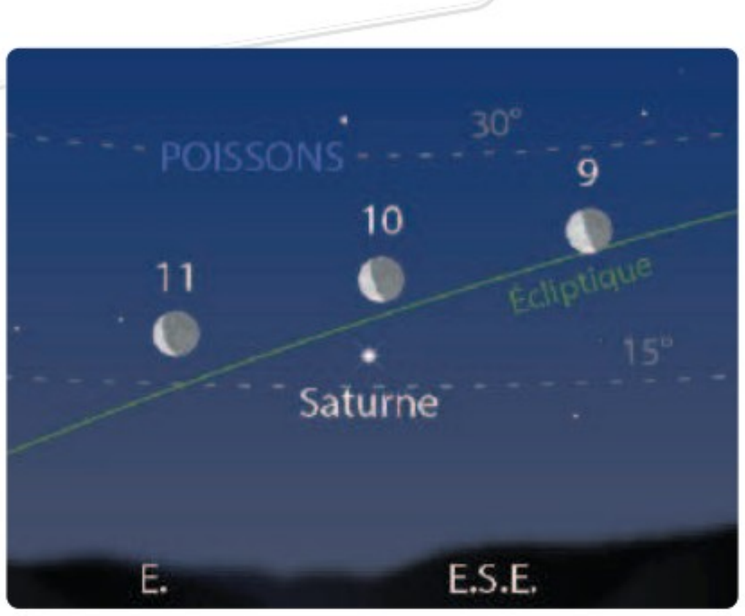
Notre conseil Choisissez un horizon parfaitement dégagé et observez dès la nuit tombante. Repérez d'abord Vénus, très brillante, puis utilisez-la pour localiser Jupiter et Mercure. Des jumelles facilitent le repérage de cette dernière, très basse.

JUPITER La plus massive des planètes est encore visible en soirée vers l'ouest, mais elle décline rapidement et se rapproche de Vénus, formant avec elle un duo serré — mais temporaire — le 9.

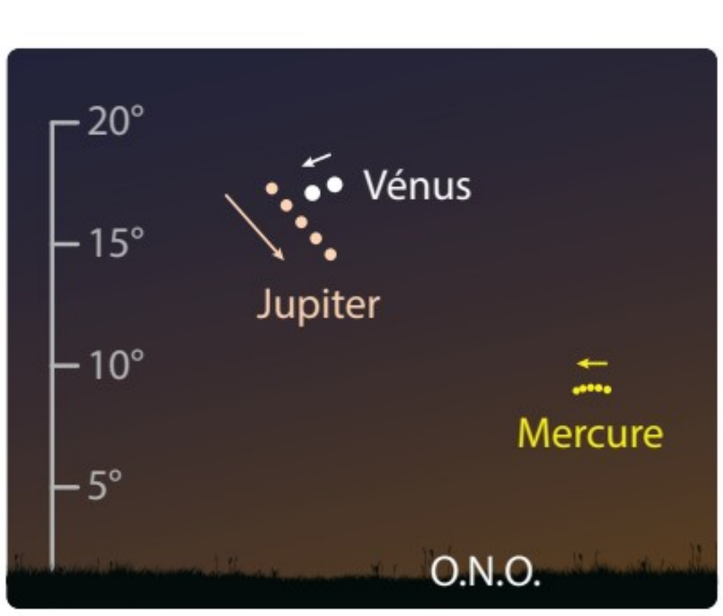
SATURNE La planète aux anneaux est désormais bien installée en seconde partie de nuit, visible vers l'est avant l'aube. Elle quitte la constellation de la Baleine pour les Poissons le 3 et gagne progressivement en hauteur au fil des jours, devenant de plus en plus facile à observer.

L'appli du mois

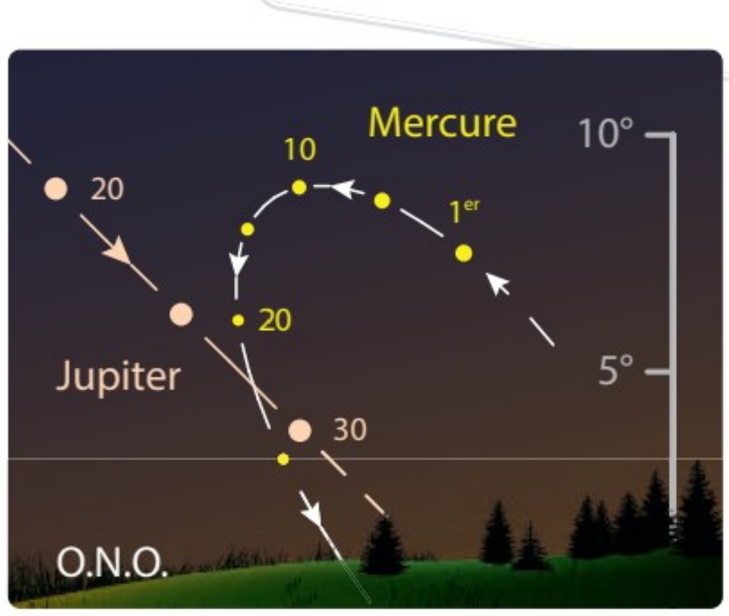
SKY GUIDE, disponible sur iOS, convertit votre téléphone en planétarium interactif. Elle permet d'identifier étoiles, planètes et satellites en pointant simplement l'appareil vers le ciel. Son interface est soignée et propose une navigation intuitive. Le plus ? Des notifications pour les événements spéciaux.



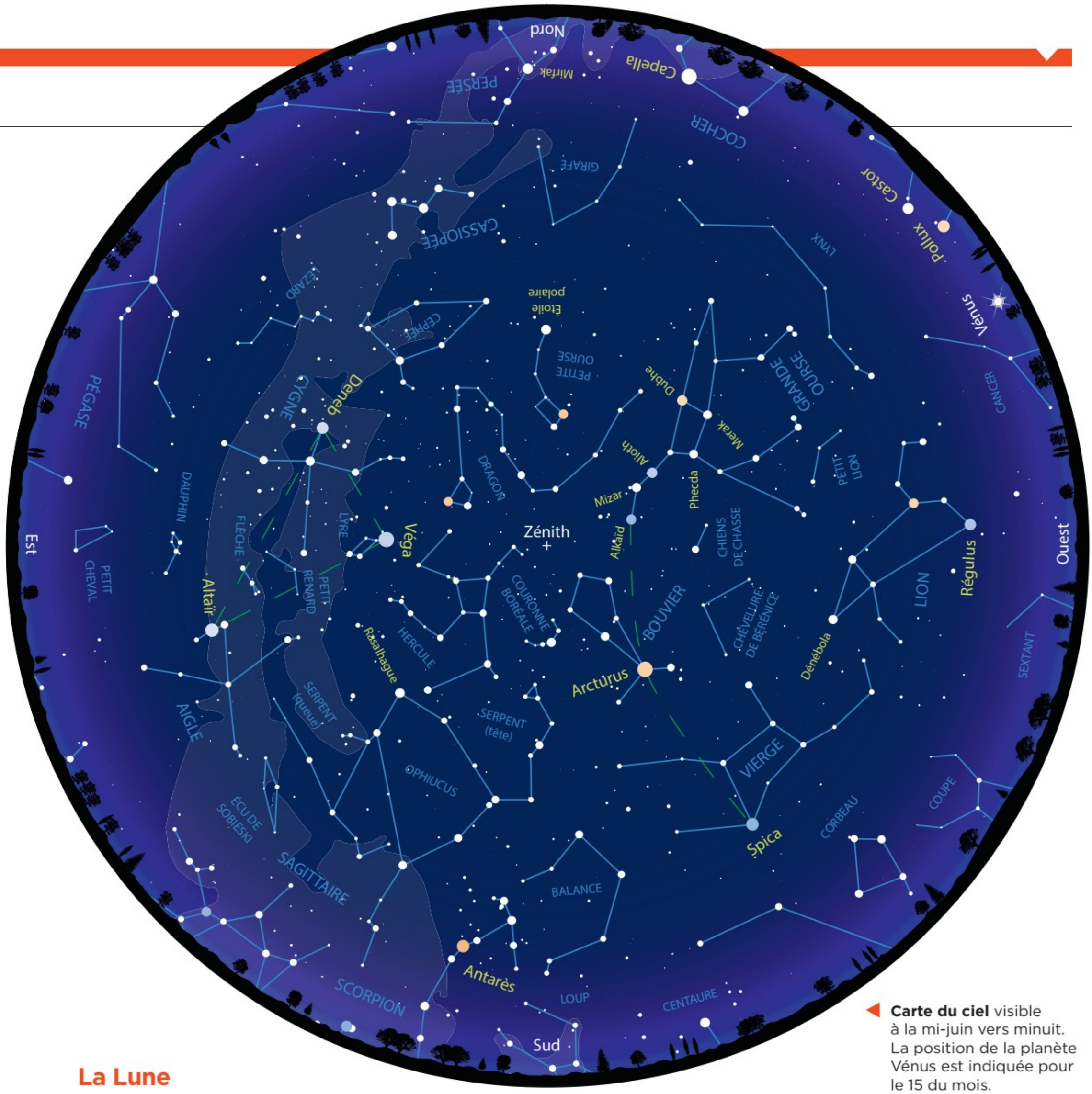
LE 10, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, le dernier croissant de Lune croise Saturne dans les Poissons, à une quinzaine de degrés au-dessus de l'horizon est-sud-est.



DU 7 AU 11, 45 MIN APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, les planètes Mercure, Vénus et Jupiter évoluent bas vers l'ouest-nord-ouest. Le 9, Vénus frôle Jupiter à 1,5 degré.



45 MIN APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, Mercure, bas vers l'ouest-nord-ouest, culmine vers le 9 puis décline, tandis que son éclat décroît. Jupiter la rejoint en fin de mois.



Carte du ciel visible à la mi-juin vers minuit. La position de la planète Vénus est indiquée pour le 15 du mois.

La Lune

Dernier quartier : lundi 8 à 12 h (la Lune se trouve alors dans la constellation du Verseau)

Nouvelle Lune : lundi 15 à 5 h (Taureau)

Premier quartier : lundi 22 à 0 h (Vierge)

Pleine Lune : mardi 30 à 2 h (Sagittaire)

Le Soleil

(à Paris)	Lever	Coucher
1er juin	**5 h 54**	**21 h 44**
30 juin	**5 h 52**	**21 h 56**

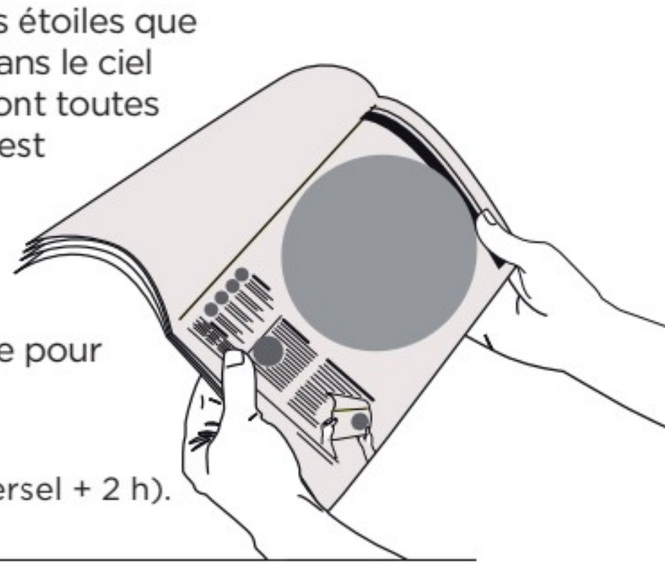
Solstice d'été le 21 à 10 h 24

D'où voir le ciel

Notre carte tracée pour une latitude de 47° nord montre le ciel visible en France métropolitaine, et plus largement en Europe et dans le monde, à l'intérieur d'une bande s'étendant de 40 à 54° de latitude nord. Si vous êtes au nord du 47e parallèle, l'étoile Polaire sera plus haute dans votre ciel et plus basse dans le cas contraire.

Comment utiliser cette carte

Faites tourner votre magazine sur lui-même, de façon que le nom de la direction dans laquelle vous observez soit écrit à l'endroit. Les constellations et les étoiles que vous retrouverez dans le ciel qui vous fait face sont toutes celles dont le nom est lisible sans trop pencher la tête. La position des planètes visibles à l'œil nu est indiquée pour le 15 du mois.



Les heures sont données en heure légale française (temps universel + 2 h).

Suivez-nous au quotidien sur le Web

www.sciencesetavenir.fr

MARTIN HARVEY / BIOSPHOTO

ÉVOLUTION

Le mystère de la reproduction des mammifères

JULIEN BENOIT

Ce petit nodule fossilisé, découvert en 2008, vient seulement de livrer ses secrets : de quoi valider une théorie vieille de 200 ans sur l'évolution de la reproduction des mammifères. Explications en vidéo. sciav.fr/952fossile

ANIMAUX

Bruce, le caïd des perroquets

ALEX GRABHAM

Privé de la moitié supérieure de son bec, Bruce semblait condamné à une vie difficile. Pourtant, ce kéa néo-zélandais est devenu le mâle dominant de son groupe en inventant une technique de combat inédite. Résultat : 36 combats et zéro défaite. Explications en vidéo. sciav.fr/952kea

Le top 5 du mois

- **Une guerre civile filmée chez les chimpanzés.** sciav.fr/952chimp
- **Santé publique : des médecines alternatives qui « posent problème ».** sciav.fr/952altmed
- **Cryogénisation : un cerveau congelé à -140 °C puis réactivé.** sciav.fr/952cryog
- **Du ventre à 40 ans ? Voici pourquoi c'est normal.** sciav.fr/952ventre
- **Une carte des pesticides dans l'air.** sciav.fr/952pest

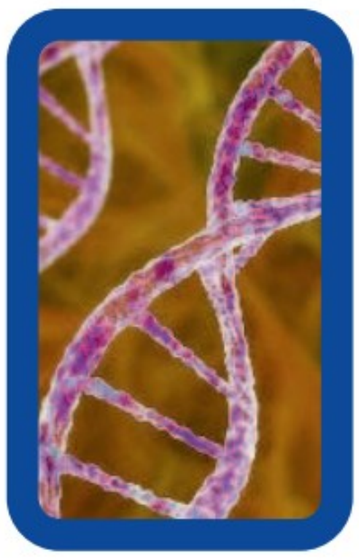
DÉCRYPTAGE

Éléphants d'Afrique : la fracture génétique

Une plongée inédite dans l'ADN des éléphants d'Afrique dévoile une histoire bien plus complexe qu'on ne l'imaginait. Grâce au plus vaste séquençage de génome jamais réalisé chez l'espèce, les chercheurs ont mis au jour des dynamiques insoupçonnées entre populations. Des résultats qui éclairent d'un jour nouveau leur évolution récente, et pourraient peser lourd dans les stratégies de conservation à venir. sciav.fr/952elephant

LES SUJETS QUI VOUS FONT RÉAGIR

SUR LES RÉSEAUX SOCIAUX



AFP

LinkedIn

Des « robots » moléculaires capables de reconnaître et de détruire des cellules cancéreuses : c'est la promesse de ces nouvelles structures composées d'ADN développées par des chercheurs de l'université de Genève (Suisse). sciav.fr/952adnrobot

AFP

Instagram

La pellicule d'un trésor du cinéma français a été retrouvée dans un grenier aux États-Unis : un film de Georges Méliès, réalisé en 1897, deux ans après la première projection publique des frères Lumière à Paris. sciav.fr/952cinema

PIXABAY

Facebook

Chez les mésanges charbonnières, les jeunes apprennent bien plus de leurs frères et sœurs que de leurs parents pour résoudre des problèmes liés à la nourriture, montre une étude. sciav.fr/952mesange

LABORATOIRES
ILAPHARM
ilapharm.com

Des solutions santé naturelle adaptées pour vous !

"Les produits des Laboratoires ILAPHARM me conviennent tout à fait, ils sont efficaces."
Avis vérifiés Juin 2025 - Rita M. ★★★★★

OFFRE DÉCOUVERTE
TOUT À 7€*

**Offre valable 2 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Retrouvez, sur le bon de commande, la quantité recommandée par nos experts pour une efficacité optimale de nos produits !

ARTICULATIONS

- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum *(1)*

45 gélules
Durée : 15 jours

OS & ARTICULATIONS

- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

500 ml
Durée : 20 jours
~~23,60€~~

JAMBES LOURDES

- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules
Durée : 15 jours

CAPITAL-VISION

- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle *(11)*

10 ampoules
Durée : 10 jours
~~20,50€~~

LIBIDO

- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran BIO !

45 comprimés
Durée : 15 jours

SEXUALITÉ

- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca BIO ! *(8)*

20 gélules
Durée : 10 jours

VIDER SA VESSIE

- Envies intempestives d'uriner
- Efficacité prouvée dès 4 semaines

45 gélules
Durée : 15 jours

PROSTATE

- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules
Durée : 22 jours

SOMMEIL

- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules
Durée : 22 jours

CHOLESTÉROL

- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire *(9), (10)*

30 gélules
Durée : 10 jours

MINCEUR

- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal BIO ! *(1), (2), (4), (13)*

45 gélules
Durée : 15 jours

CAPTEUR DE GRAISSES

- Association brevetée de fibres alimentaires
- Idéal avec le Guarana BIO !

45 gélules
Durée : 8 jours

STRESS

- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

Allergène : ***poisson***. *(5)*

45 gélules
Durée : 22 jours

FOIE - DRAINEUR

- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie *(4), (6), (7)*

10 ampoules
Durée : 5 jours
~~17,70€~~

IMMUNITÉ

- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année ! *(7), (14)*

45 gélules
Durée : 15 jours

OLIGO-ÉLÉMENT

- Oligo-élément essentiel
- Vision, os, cerveau immunité
- Forme assimilable

30 comprimés
Durée : 1 mois
~~13,00€~~

Produits déconseillés aux moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Contient de la caféine (50 mg par jour). (3) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (4) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (5) Ne convient pas aux insuffisants rénaux. (6) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (7) Déconseillé en cas d'allergie aux Asteraceae. (8) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (9) Ne pas associer avec des anticoagulants. (10) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (11) En cas de troubles digestifs consultez votre médecin avant consommation. (12) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (13) Déconseillé en cas de troubles cardiaques. (14) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits. Couteau pliable avec tire-bouchon, marqué Laguiole en acier inoxydable. Dimensions ouvert 21,5 cm et fermé 11,5 cm.

VOS CADEAUX

Le Couteau de Poche

OFFERT
Dès 20€ d'achat

Couteau ouvert avec son tire-bouchon

0€ Livraison
Dès 25€ d'achat
Au lieu de ~~6,50€~~

Commandez sur :
ilapharm.com

2ème CADEAU OFFERT
Dès 30€ d'achat

COMMANDEZ SUR :
ilapharm.com
ou avec votre smartphone

CODE PRIVILÈGE :
CB607

OFFRE DÉCOUVERTE - SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

@ **ilapharm.com**

Possibilité de régler par chèque

LABORATOIRES ILAPHARM
27, rue de Solférino - 92100 BOULOGNE-BILLANCOURT
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi 9h -13h et 14h -18h

COORDONNÉES ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

.....

Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail : .....

Pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

MODE DE PAIEMENT

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :**

○ débit immédiat
○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

GARANTIES

SATISFAIT OU REMBOURSÉ – GARANTIE 1 MOIS

PAYEZ DANS 1 MOIS
Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande,** il ne sera encaissé que dans 1 mois.

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste

Quantité RECOMMANDÉE pour une CURE COMPLÈTE

NOM DU PRODUIT	RÉF.		QTÉ	PRIX UNITAIRE	TOTAL
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45	x3		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSI	x3		7€	
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45	x3		7€	
VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB	x3		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45	x3		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20	x3		7€	
VESSIE - Saw Palmetto BIO	PSPB45	x3		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45	x2		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45	x3		7€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30	x3		7€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45	x3		7€	
CAPTEUR DE GRAISSES - Nopal BIO	PNOB45	x3		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45	x3		7€	
DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB	x3		7€	
IMMUNITÉ - Echinacéa BIO	PECB45	x3		7€	
OLIGO-ÉLÉMENT - Zinc	PCZN	x3		7€	
☐ Ma commande atteint 20€, je reçois mon **COUTEAU DE POCHE**					OFFERT
☐ Ma commande atteint 25€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**					OFFERTE
☐ Ma commande est inférieure à 25€, **je rajoute 6,50€ de livraison**					
Code Privilège : **CB607**				**TOTAL À RÉGLER**	..... €

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38112 €, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité du cadeau, il sera remplacé par un autre d'une valeur similaire. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits du Règlement européen sur la protection des données, écrivez-nous ou voir nos C.G.V sur notre site ilapharm.com/condition-generales-de-vente. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés (détails articles L.217-4 et suivants du Code de la consommation). Délai de rétractation : 30 jours après livraison de votre commande, pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitement de la commande : 48h suivant sa réception, livraison après 72h d'acheminement environ. Nous adhérons à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages et papiers : FR202486_01JWKA, Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, www.mangerbouger.fr. Cochez la case, pour ne pas recevoir nos offres ☐, celles de nos partenaires ☐, ou écrivez-nous.

Pensez
à autre chose
qu'à votre
consommation
d'énergie.

ENGIE le fait
pour vous.

J'agis
avec
ENGIE

Avec l'application ENGIE*,
fixez vos objectifs
de consommation d'énergie
et soyez alerté
si vous les dépassez.

ENGIE

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Ma Conso, service gratuit disponible pour toute souscription à une offre d'énergie ENGIE et conditionné à la création d'un Espace Client. Voir détails et conditions sur particuliers.engie.fr. ENGIE : SA AU CAPITAL DE 2 542 427 868 € - RCS NANTERRE 542 107 651. © Manu Fauque.